

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**
частина 3

Попова І.О.,
Курашкін С. Ф.,
Вовк О.Ю.,
Попрядухін В.С.

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
ДЛЯ
ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Мелітополь
2018

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет

Попова І.О., Курашкін В.С., Вовк О.Ю., Попридухін В.С.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

частина 3

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ
РОБІТ**

*Рекомендовано Вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного університету
як посібник для підготовки здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі
спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Мелітополь
2018

УДК [621. 3.01.001 (075.8)]
П58

*Гриф надано Вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного університету
(протокол № 3 від 30 жовтня 2018 р.)*

Укладачі: **Попова І.О., доцент Таврійського ДАТУ,**
Курашкін С.Ф., доцент Таврійського ДАТУ,
Вовк О.Ю., доцент Таврійського ДАТУ,
Попрядухін В.С., доцент Таврійського ДАТУ.

Рецензенти:

О.Д. Черенков, д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії та теоретичної електротехніки Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка

І.П. Назаренко, д.т.н., професор, декан енергетичного факультету, завідувач кафедри «Електротехнології і теплові процеси», Таврійський державний агротехнологічний університет.

В.Ф. Яковлєв, к.т.н., професор, завідувач кафедри електротехнічних систем в АПК та фізики, Сумський національний аграрний університет.

Попова І.О.

П58 Теоретичні основи електротехніки, частина 3: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / І.О. Попова, С.Ф. Курашкін, О.Ю. Вовк, Попрядухін В.С. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 245 с.

У навчальному посібнику зібраний, систематизований та викладений теоретичний і методичний матеріал, який охоплює практичні питання нелінійних кіл постійного струму, магнітних кіл при постійних потоках і синусоїдній напрузі, перехідні процеси в колах постійної і змінної ЕРС, кола з розподіленими параметрами і аналіз електромагнітного поля та опрацювання отриманих результатів експериментів. Структура кожної лабораторної роботи, їх зміст та ілюстрації теоретичного матеріалу, є методично обґрунтованими та роблять посібник зручним для самостійного опрацювання матеріалу студентами як денної, так й заочної (дистанційної) форми навчання.

Навчальний посібник призначений для викладачів при підготовці до лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки, частина 3», а також для студентів вищих навчальних закладів при підготовці здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

@ Попова І.О.
@ Курашкін С.Ф.
@ Вовк О.Ю.
@ Попрядухін В.С.
@ «Таврійський державний агротехнологічний університет», 2018

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	5
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО І СТАТИЧНОГО ОПОРУ ЕЛЕМЕНТІВ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	7
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	17
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРОЗГАЛУЖЕНИХ МАГНІТНИХ КІЛ ПРИ ПОСТІЙНИХ МАГНІТНИХ ПОТОКАХ.....	29
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНИХ МАГНІТНИХ КІЛ ПРИ ПОСТІЙНИХ МАГНІТНИХ ПОТОКАХ.....	47
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРЕДДЯМ.....	62
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТИВНОЇ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ.....	81
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ. ФЕРОРЕЗОНАНС НАПРУГИ.....	94
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ.....	110

Лабораторна робота	133
ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В КОТУШЦІ У ЛІНІЙНИХ КОЛАХ З ПОСТІЙНОЮ ЕРС.....	
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ І РОЗРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ З ПОСТІЙНОЮ ЕРС.....	158
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИМИ КОТУШКОЮ І КОНДЕНСАТОРОМ.....	175
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕРОЗГАЛУЖЕНОМУ КОЛІ З КОТУШКОЮ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ЇЇ ДО ДЖЕРЕЛА СИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ.....	197
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ З СИНУСОЇДНОЮ ЕРС.....	208
Лабораторна робота	
ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОЇ ОДНОРІДНОЇ ЛІНІЇ БЕЗ ВТРАТ.....	219
Лабораторна робота	
МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНОГО ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ В ЛИСТАХ, ЩО ПРОВОДЯТЬ СТРУМ.....	234
Додатки.....	246

ПЕРЕДМОВА

Теоретичні основи електротехніки є фундаментальною дисципліною, на базі якої вивчаються всі інші електротехнічні дисципліни ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності. При вивченні дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» студенти оволодівають методами розрахунку електромагнітних процесів і відповідних перетворень енергії, засвоюють основні поняття та закони, пов'язані з практичним використанням електричних та магнітних явищ, засвоюють методи аналізу електромагнітного поля.

Навчальний посібник «Теоретичні основи електротехніки, частина 3» призначений для проведення лабораторних робіт на основі вивчення теоретичного матеріалу з курсу теоретичних основ електротехніки для підготовки здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Навчальний посібник охоплює практичні питання нелінійних кіл постійного струму, магнітних кіл при постійних потоках і синусоїдній напрузі, перехідні процеси в колах постійної і змінної ЕРС, кола з розподіленими параметрами і аналіз електромагнітного поля.

Структура кожної лабораторної роботи, зміст та теоретичний матеріал роблять посібник зручним для самостійного опрацювання матеріалу студентами, як денної, так і заочної (дистанційної) форм навчання.

Виконання лабораторних робіт передбачається здійснювати в два етапи: на першому (підготовчому) вивчається теорія і здійснюється підготовка згідно завдання для самостійної підготовки, на другому (заключному) виконується експериментальна частина і проводиться остаточна обробка результатів. Експериментальна частина лабораторних робіт виконується на

універсальних лабораторних стендах. Лабораторні роботи з дослідження довгої лінії і теорії електростатичного поля поставлені на основі математичного моделювання фізичних процесів і виконуються за допомогою комп'ютерної техніки.

Рівень наведеного матеріалу ґрунтується на знаннях з розділу «Електромагнетизм» дисципліни фізика та теми дисципліни вищої математики: «Елементи векторної лінійної алгебри», «Введення в математичний аналіз», «Диференційні обчислювання функції однієї змінної», «Дослідження функцій за допомогою похідних», «Комплексні числа і функції», «Невизначений інтеграл», «Визначений інтеграл», «Функції декількох змінних», «Звичайні диференційні рівняння», «Ряди», «Векторний аналіз», «Основні рівняння математичної фізики», «Операційні обчислювання» та інші в обсязі навчальних програм названих дисциплін.

Підчас підготовки навчального посібника враховані і використані гарні традиції та багаторічний досвід викладання дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» на кафедрі «Електротехніка і електромеханіка імені професора В.В. Овчарова» Таврійського державного агротехнологічного університету.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО І СТАТИЧНОГО ОПОРУ ЕЛЕМЕНТІВ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при визначенні динамічного і статичного опорів елементів нелінійних кіл постійного струму графо-аналітичним методом

Основні теоретичні відомості

Відомо, що в реальних умовах всі електричні кола є нелінійними, а лінійними їх можна вважати в обмеженому діапазоні значень сил струмів і напруг. Наприклад, при проходженні струму по проводу спостерігається теплова дія струму, внаслідок чого збільшується опір проводу. Вольт-амперні характеристики нелінійних елементів мають вигляд кривих. На рис.1 показана вольт-амперна характеристика лампи розжарювання.

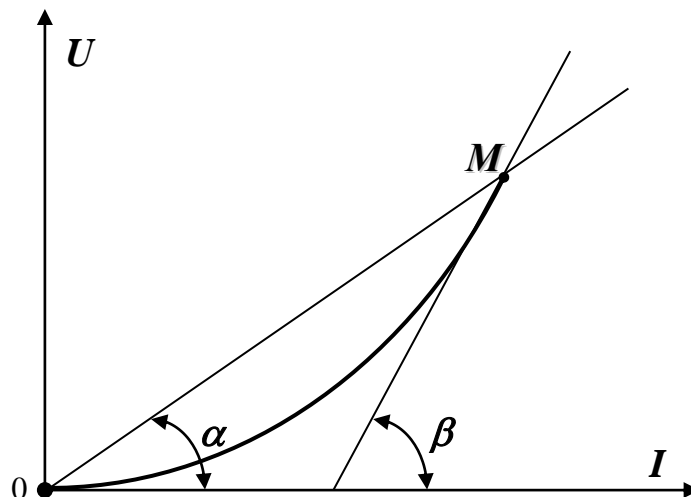


Рисунок 1 – Вольт-амперна характеристика нелінійного елемента

Робоча точка нелінійного елемента характеризується **статичним** і **динамічним** опорами.

Під **динамічним** опором розуміють скалярну величину, рівну межі відношення приросту напруги на нелінійному елементі до приросту струму в ній, коли приріст струму прагне до нуля.

$$r_{\text{Д}} = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI} , \quad (1)$$

Вольт-амперні характеристики нелінійних елементів не завжди можна описати аналітичним рівнянням. Динамічний опір нелінійного елемента в цьому випадку можна визначити графоаналітичним способом: якщо в робочій точці M провести дотичну, то вона утворить з віссю струму кут α . Значення динамічного опору пропорційно тангенсу кута α і визначають за рівнянням

$$r_{\text{Д}} = m_{\text{r}} \operatorname{tg} \alpha , \quad (2)$$

де $r_{\text{Д}}$ – динамічний опір, Ом;

m_{r} – масштаб опору, Ом/мм.

Масштаб опору дорівнює частці від ділення масштабу напруги на масштаб струму

$$m_{\text{r}} = \frac{m_{\text{U}}}{m_{\text{I}}} , \quad (3)$$

де m_U – масштаб напруги, $B/мм$;

m_I – масштаб струму, $A/мм$.

Під статичним опором розуміють величину, рівну відношенню постійної напруги на нелінійному елементі до постійного струму в ньому у робочій точці.

$$r_C = \frac{U}{I}, \quad (4)$$

де r_C – статичний опір, $Ом$.

Для визначення статичного опору графоаналітичним методом необхідно з'єднати робочу точку M з початком координат лінією, яка утворить з віссю струму кут β . Значення статичного опору пропорційно тангенсу кута β і визначають за рівнянням

$$r_C = m_r \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

Зображення нелінійного елементу на розрахункових схемах наведено на рис. 2.

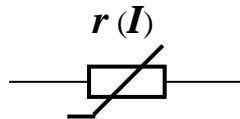
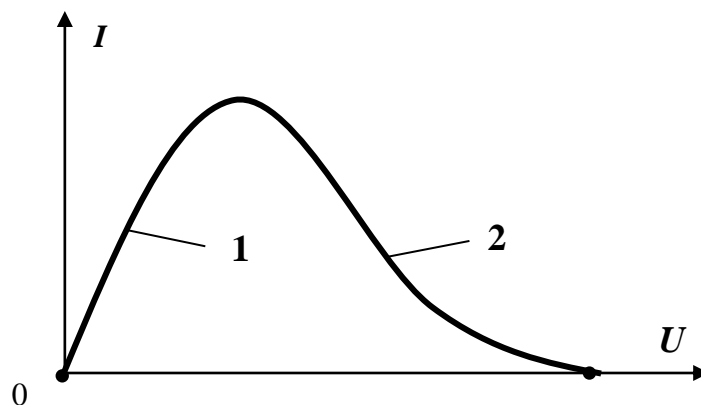


Рисунок 2 – Зображення нелінійного елементу на розрахункових схемах

Для нелінійного елементу статичний і динамічний опори різні за величиною.

Якщо динамічний опір зростає при збільшенні струму на нелінійному елементі, то такий динамічний опір є **позитивним**. Якщо динамічний опір зростає при зменшенні струму на нелінійному елементі, то такий динамічний опір є **негативним**. Ділянки з позитивним і негативним опором має вольт-амперна характеристика лямбда-діода (рис. 3).



1 - ділянка ВАХ з позитивним динамічним опором; 2 - ділянка ВАХ з негативним динамічним опором

Рисунок 3 – Вольт-амперна характеристика аналог лямбда-діода

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Опрацювати теоретичний матеріал за темою 13 «Нелінійні кола постійного струму [1: с.165-166], [2: с.386-398], [3: с.330-332].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 13.1 [4].
- 3 Виконати тестові контрольні завдання для самоаналізу додатку А.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.
- 2 Зібрати схему експериментальної установки.
- 3 Зняти вольт-амперну характеристику лампи розжарювання.

- 4 Зняти вольт-амперну характеристику резистора
- 5 Розрахувати величини статичних і динамічних опорів елементів електричного кола графо-аналітичним методом.
- 6 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Уміти визначити статичний і динамічний опір лампи розжарювання за допомогою експериментальних даних.
- 4 Уміти визначити статичний і динамічний опір резистора за допомогою експериментальних даних.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з генератора постійного струму G , регулятора напруги R_H , лампи розжарювання EL , резистора R , вимикачів QS_1 , QS_2 , амперметра PA , вольтметра PV .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 3.

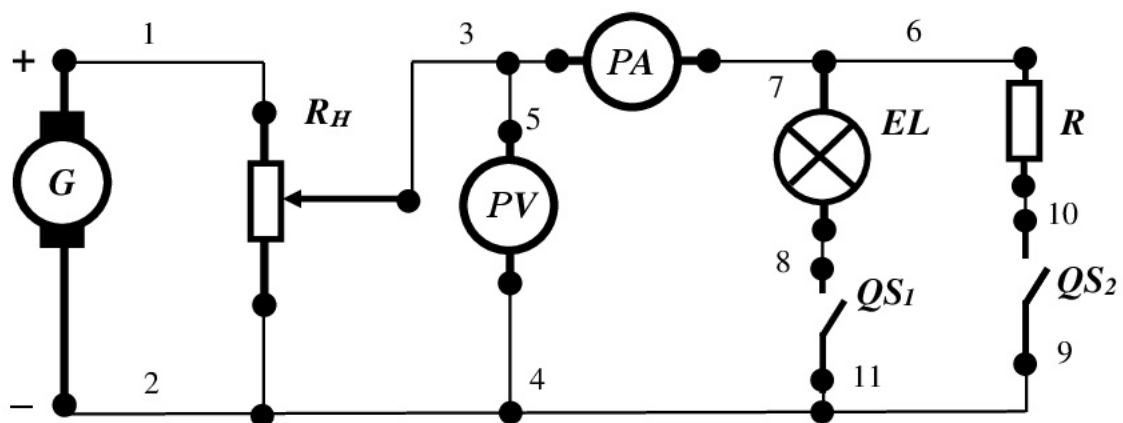


Рисунок 3 - Принципова електрична схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 11 провідників (на схемі позначені номерами 1-11).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;

- опір обмотки амперметра дорівнює нулю;

- опори обмотки вольтметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у ній відсутній.

- Тоді розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при включенні вимикачів QS_1 або QS_2 має вигляд, наведений на рисунку 4.

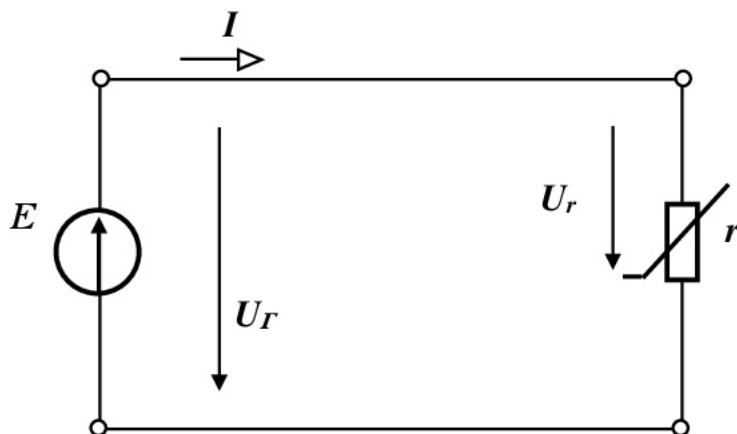


Рисунок 4 – Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

E – електрорушійна сила генератора, B ;

r – опір лампи розжарювання (при включенні QS_1) або резистора (при включенні QS_2), Ω ;

U_{Γ} – напруга на затискачах генератора, V ;

U_r – спадання напруги на опорі лампи розжарювання або резистора, V ;

I – сила струму в колі, A ;

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 2 Включити вимикач QS_1 і виключити вимикач QS_2 експериментальної установки.
- 3 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.
- 4 Змінюючи напругу за допомогою регулятора напруги від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує $1A$, зняти показання приладів у колі лампи розжарювання, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1.1 – Результати експериментальних досліджень
вольт-амперної характеристики лампи розжарювання $U_{\lambda}(I)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів								
Вимикач QS_1 замкнений, вимикач QS_2 розімкнений	U_{λ} , V								
	I , A								

- 5 Виключити вимикач QS_1 і включити вимикач QS_2 експериментальної установки.

6 Змінюючи напругу за допомогою регулятора напруги від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1А, зняти показання приладів у колі резистора, результати занести в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати експериментальних досліджень
вольт-амперної характеристики резистора $U_p(I)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів								
Вимикач QS_2 замкнений, вимикач QS_1 розімкнений	U_p , В								
	I , А								

7 Побудуйте за результатами експериментальних досліджень таблиці 1.1 вольт-амперну характеристику лампи розжарювання $U_L(I)$ в обраному масштабі.

8 Визначити графо-аналітичним методом:

- масштаб опору за формулою (3);
- динамічний опір лампи розжарювання $r_{д1}$ при силі струму I_P , заданій викладачем за формулою (2);
- статичний опір лампи розжарювання $r_{с1}$ при силі струму I_P , заданій викладачем за формулою (5):

9 Побудуйте за результатами експериментальних досліджень таблиці 1.2 вольт-амперну характеристику резистора $U_p(I)$ в обраному масштабі.

10 Визначити графо-аналітичним методом:

- масштаб опору, використавши рівняння (3);
- динамічний опір резистора $r_{д2}$ при силі струму I_P у робочій точці, заданій викладачем за формулою (2);

– статичний опір лампи розжарювання r_{c2} при силі струму I_P , у робочій точці, заданій викладачем за формулою (5).

11 Занести отримані значення статичного і динамічного опорів лампи розжарювання і резистора в таблицю 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунків опорів

Величини опорів елементів кола					
Лампа розжарювання			Резистор		
I_P, A	$r_{d1}, Ом$	$r_{c1}, Ом$	I_P, A	$r_{d2}, Ом$	$r_{c2}, Ом$

Зміст звіту

- 1 Найменування лабораторної роботи.
- 2 Мета лабораторної роботи.
- 3 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 4 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.
- 5 Графіки вольт-амперних характеристик лампи розжарювання $U_L(I)$ і резистора $U_P(I)$.
- 6 Таблиця 1.
- 7 Таблиця 2.
- 8 Таблиця 3.
- 9 Висновок щодо порівняння величин статичного і динамічного опору лампи розжарювання і резистору.

Контрольні запитання

- 1 Що називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ) елемента електричного кола?

- 2 Які елементи електричного кола називаються лінійними?
- 3 Які елементи електричного кола називаються нелінійними?
- 4 Приведіть приклади нелінійних елементів.
- 5 Які нелінійні елементи називають симетричними?
- 6 Які нелінійні елементи називають несиметричними?
- 7 Що називається статичним опором нелінійного елемента?
- 8 Як розрахувати статичний опір нелінійного елемента?
- 9 Що називається динамічним опором нелінійного елемента?
10. Як розрахувати динамічний опір нелінійного елемента?
- 11 Як розрахувати масштаб опору?
- 12 Що розуміють під позитивним динамічним опором?
- 13 Що розуміють під негативним динамічним опором?
- 14 Наведіть приклади нелінійних елементів, що мають негативний динамічний опір.
- 15 Наведіть приклади нелінійних елементів, що мають позитивний динамічний опір.

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Ч.1. /Л.А. Бессонов. – М.: Высш. Шк., 1978. – 517 с.
- 4 Попова І.О. Тематичний робочий зошит для лабораторних занять з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки, частина 1». Тема 13 «Нелінійні кола постійного струму» /І.О. Попова. – Мелітополь : ТДАТУ, 2016. – 27 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при дослідженні вольт-амперних характеристик нелінійного електричного кола при послідовному і паралельному з'єднанні елементів.

Основні теоретичні відомості

Розрахункова схема двох послідовно з'єднаних нелінійних елементів $r_1(I_1)$ і $r_2(I_2)$ показана на рисунку 1, вольт-амперні характеристики яких $I_1(U_1)$ і $I_2(U_2)$ зображені на рисунку 2.

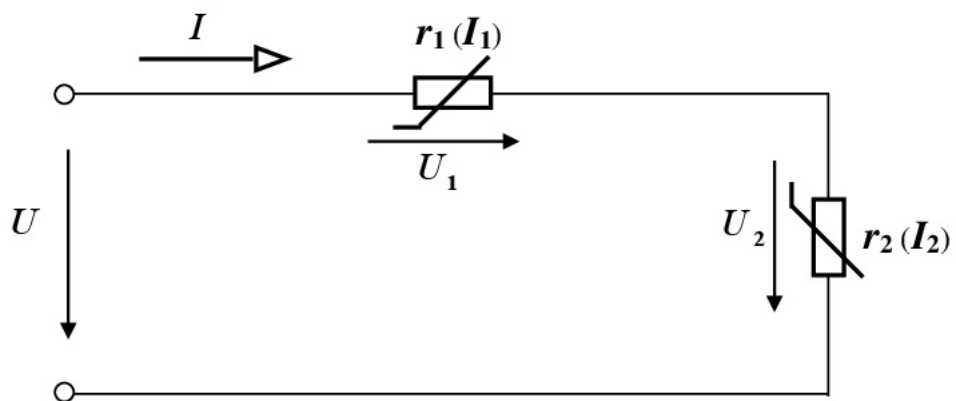


Рисунок 1 – Розрахункова схема двох послідовно з'єднаних нелінійних елементів $r_1(I_1)$ і $r_2(I_2)$

Якщо напруга на затисках ділянки кола дорівнює U . Необхідно знайти струм I та напруги U_1 і U_2 на нелінійних елементах.

Розрахуємо таке коло графічним методом. З цією метою будемо допоміжну характеристику для всієї ділянки кола, яка являє собою залежність струму I від загальної напруги U . Оскільки в нерозгалуженому

колі $I = I_1 = I_2$, то для побудови характеристики $I(U_1 + U_2)$ необхідно скласти напруги U_1 і U_2 для однієї і тієї ж сили струму I . Якщо після цього відкласти на осі напруг відрізок Oa , який у масштабі напруги m_U дорівнює напрузі U , а з точки a провести пряму ab , паралельну осі струму, до перетинання з кривою $I(U_1 + U_2)$, то одержимо відрізок ab , який у масштабі струму m_I дорівнює струму I . Потім із точки b проводимо пряму bc , паралельну осі напруги. У результаті одержимо відрізки cd і cf , які у масштабі напруги m_U дорівнюють відповідно напругам U_1 і U_2 .

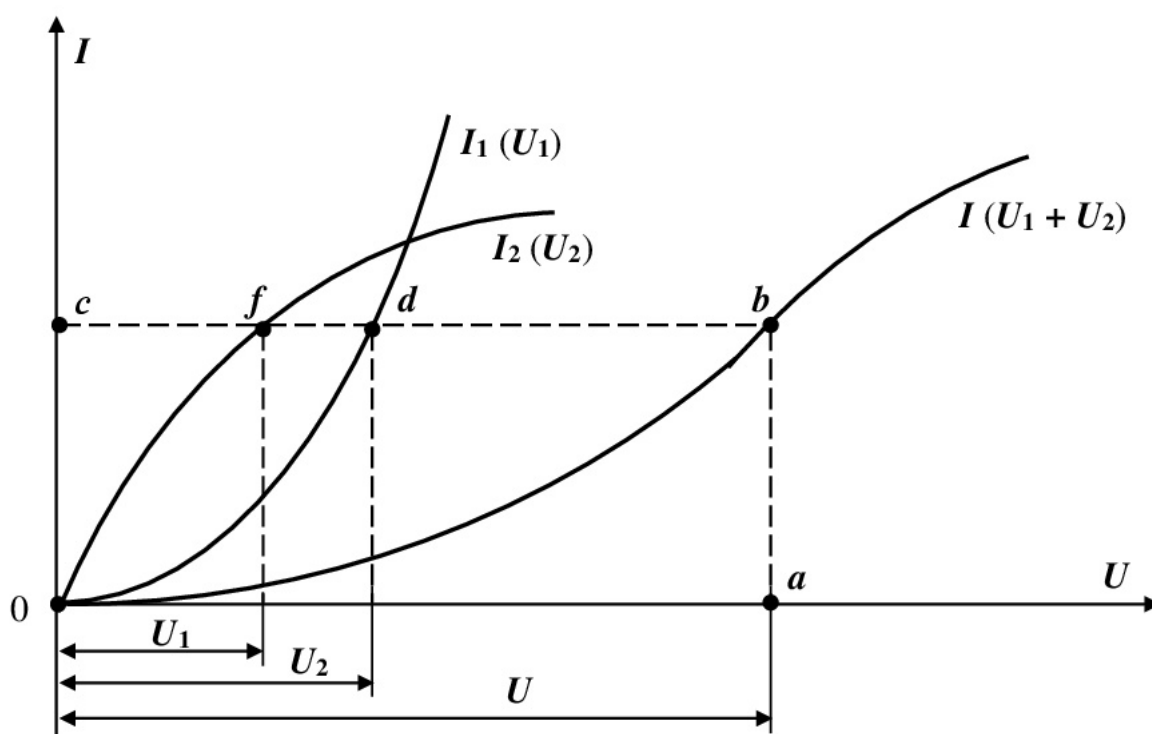


Рисунок 2 – Вольт-амперні характеристики $I_1(U_1)$ і $I_2(U_2)$ і побудова характеристики $I(U_1 + U_2)$ двох послідовно з'єднаних нелінійних елементів $r_1(I_1)$ і $r_2(I_2)$

Аналогічно розраховується коло, яке містить більшу кількість послідовно з'єднаних нелінійних елементів. На рисунку 3 показана розрахункова схема двох паралельно з'єднаних нелінійних елементів $r_1(I_1)$ і $r_2(I_2)$,

вольт-амперні характеристики яких $I_1(U_1)$ і $I_2(U_2)$ зображені на рисунку 4.

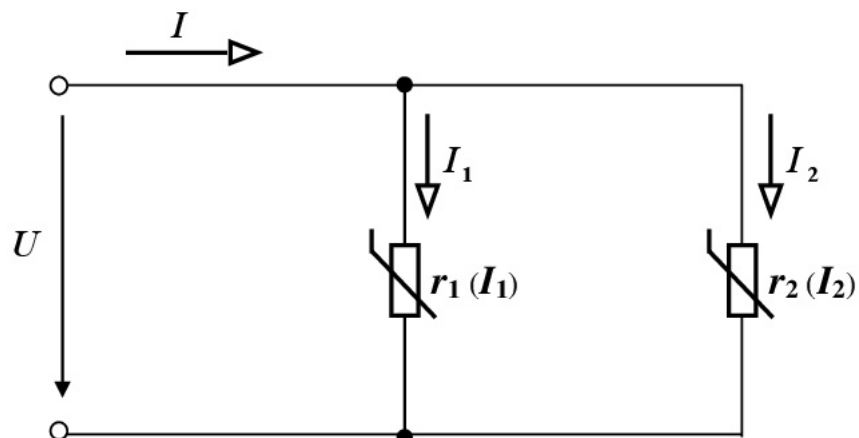


Рисунок 3 – Розрахункова схема двох паралельно з'єднаних нелінійних елементів $r_1(I_1)$ і $r_2(I_2)$

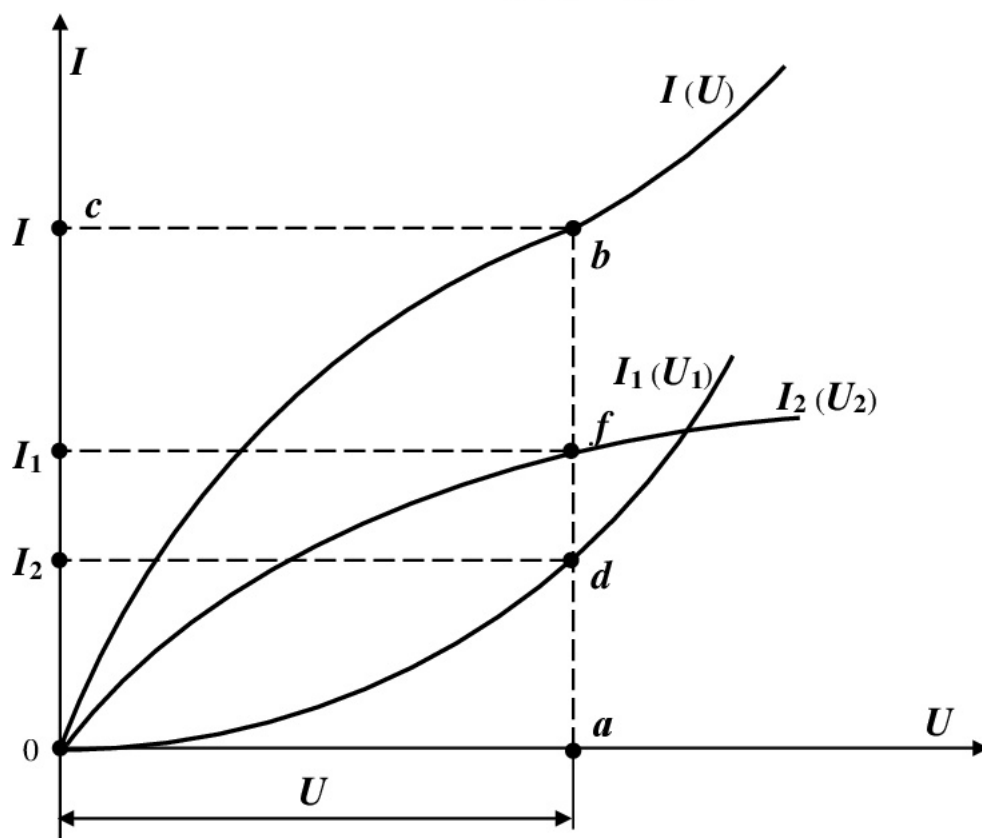


Рисунок 4 – Вольт-амперні характеристики $I_1(U_1)$ і $I_2(U_2)$ і побудова характеристики $I(U)$ двох паралельно з'єднаних нелінійних елементів $r_1(I_1)$ і $r_2(I_2)$

Якщо напругу на затисках ділянки кола прийняти рівною U , то за вольт-амперними характеристиками $I_1(U_1)$ і $I_2(U_2)$ легко знайти струми I_1 і I_2 , а за допомогою рівняння $I_1 + I_2 = I$ – струм у нерозгалуженій ділянці кола. Якщо задано струм I , то для того, щоб знайти напругу U та струми I_1 і I_2 , необхідно побудувати допоміжну характеристику $I_1 + I_2 = I(U)$. Оскільки при паралельному з'єднанні $U_1 = U_2 = U$, то відповідно до рівняння $I = I_1 + I_2$ необхідно скласти ординати кривих $I_1(U_1)$ і $I_2(U_2)$ для тих самих значень напруг $U_1 = U_2$. Якщо відкласти на осі ординат відрізок $Ос$, який у масштабі струму m_1 дорівнює струму I , а потім із точки $с$ провести пряму лінію, паралельну осі абсцис, до перетинання з кривою $I_1 + I_2 = I(U)$, то можна легко знайти напругу $U = |Оа| \cdot m_U$. Пряма ba , проведена паралельно осі ординат до перетинання з вольт-амперними характеристиками нелінійних елементів, дозволяє безпосередньо знайти струми I_1 і I_2 .

Аналогічно розраховується коло, яке містить більшу кількість паралельно з'єднаних нелінійних елементів.

При змішаному з'єднанні нелінійних елементів розрахунок кола також проводиться аналогічно приведеному вище матеріалу, який описує розрахунок кіл з послідовним і паралельним з'єднанням нелінійних елементів.

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Опрацювати теоретичний матеріал за темою 13 «Нелінійні кола постійного струму [1: с.166-168], [2: с.398-400] [3, с.330-334].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 13.2-13.3 [4].
- 3 Виконати тестові контрольні завдання для самоаналізу додатку Б.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.
- 2 Зібрати схему експериментальної установки.
- 3 Зняти вольт-амперні характеристики лампи розжарювання і резистора.
- 4 Зняти вольт-амперну характеристику нелінійного електричного кола при послідовному з'єднанні елементів кола.
- 5 Зняти вольт-амперну характеристику нелінійного електричного кола при паралельному з'єднанні елементів кола.
- 6 Оформити звіт та захистити його.

**Уміння, які здобуваються студентами в результаті
виконання експериментального дослідження**

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Уміти за допомогою експериментальних даних дослідити коло з послідовно з'єднаними елементами.
- 4 Уміти побудувати аналітичним шляхом ВАХ електричного кола з послідовно з'єднаними елементами за допомогою ВАХ резистора і лампи розжарювання.
- 5 Уміти за допомогою експериментальних даних дослідити коло з паралельно з'єднаними елементами.
- 6 Уміти побудувати аналітичним шляхом ВАХ електричного кола з паралельно з'єднаними елементами за допомогою ВАХ резистора і лампи розжарювання.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з генератора постійного струму G , регулятора напруги R_H , лампи розжарювання EL , резистора R ,

перемикач QS_1 , вимикач QS_2 , амперметра PA , вольтметра PV . Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 5.

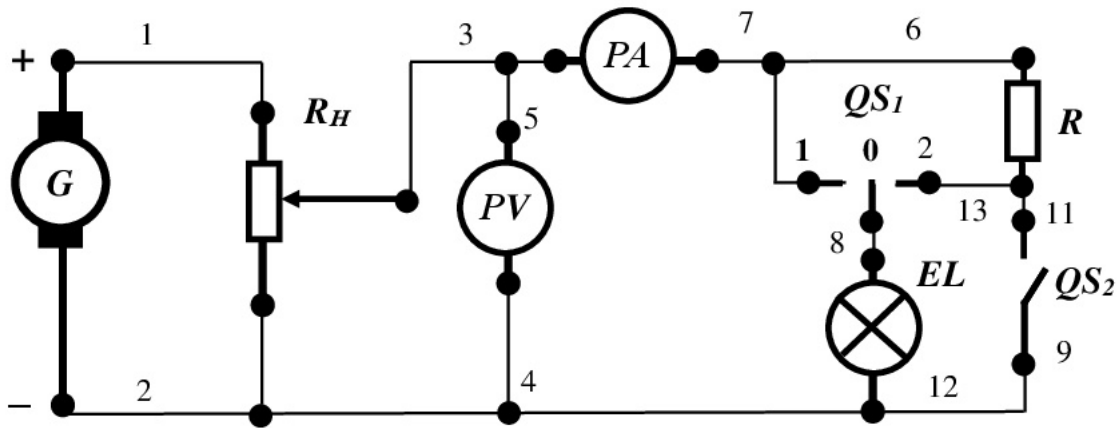


Рисунок 5 – Принципова електрична схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 14 провідників (на схемі позначені номерами 1-14).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;

- опір обмотки амперметра дорівнює нулю;

- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у ній відсутній.

- Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при послідовному з'єднанні елементів кола на рисунку 6 (коли перемикач QS_1 у положення «2» і вимикач QS_2 розімкнений).

На розрахунковій схемі (рисунок 6) введені наступні умовні позначення:

E – електрорушійна сила генератора, B ;

$r_1(I_1)$ – опір лампи розжарювання, $Ом$;

$r_2(I_2)$ – опір резистора, $Ом$;

U_{r1} – спадання напруги на опорі лампи розжарювання, B ;

U_{r2} – спадання напруги на опорі резистора, B

U_{Γ} – напруга на затискачах генератора, B ;

I – сила струму в колі, A .

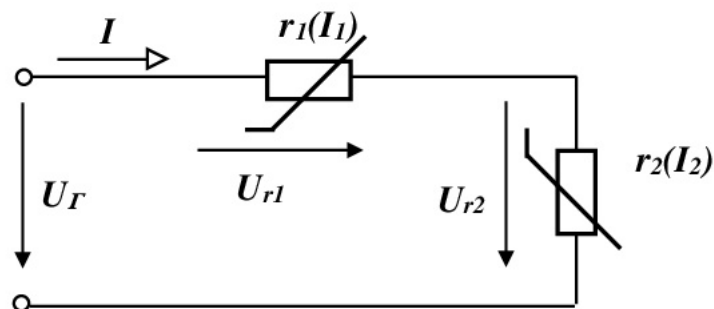


Рисунок 6 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при послідовному з'єднанні елементів

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при паралельному з'єднанні елементів кола (перемикач QS_1 у положення «1» і вимикач QS_2 замкнений), наведена на рисунку 7.

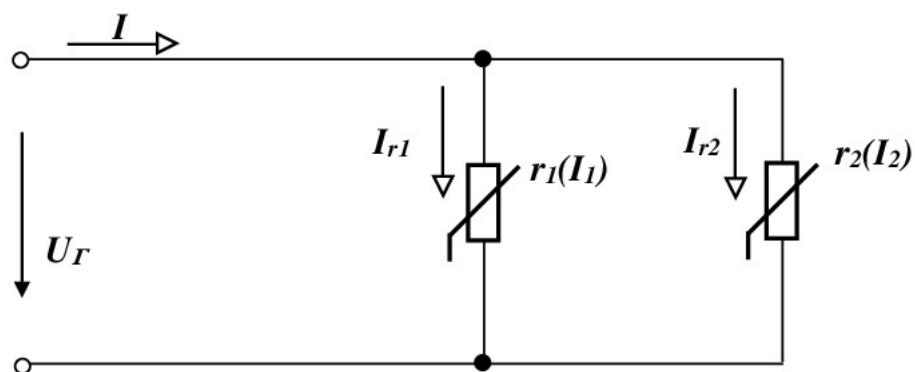


Рисунок 7 – Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при паралельному з'єднанні елементів кола

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 2 Включити перемикач QS_1 к положення 1 і виключити вимикач QS_2 .
- 3 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.
- 4 Змінюючи напругу за допомогою регулятора напруги від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1А, зняти показання приладів у колі лампи розжарювання, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень
вольт-амперної характеристики лампи розжарювання $U_{\lambda}(I)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів								
Вимикач QS_1 замкнений у положенні 1, вимикач QS_2 розімкнений	U_{λ} , В	0							
	I , А								

- 5 Включити перемикач QS_1 к положення 0 і включити вимикач QS_2 .
- 6 Змінюючи напругу за допомогою регулятора напруги від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1А, зняти показання приладів у колі резистора, результати занести в таблицю 2.
- 7 Побудувати графіки вольт-амперних характеристик лампи розжарювання $U_{\lambda}(I)$ і резистора $U_p(I)$ в одних осях.

8 Використовуючи ВАХ елементів електричного кола лампи розжарювання $U_L(I)$ і резистора $U_R(I)$ в цих же осях побудуйте ВАХ всього кола $U_I(I)$ при послідовному їхньому з'єднанні (аналітична ВАХ при послідовному з'єднанні).

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень вольт-амперної характеристики резистора $U_R(I)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів								
Вимикач QS_1 замкнений у положенні 0, вимикач QS_2 замкнений	U_R , В	0							
	I , А								

9 Включити перемикач S_1 у положення «2» і виключити вимикач S_2 для дослідження кола з послідовно з'єднаними елементами.

10 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

11 Змінюючи напругу за допомогою регулятора напруги від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1А, зняти показання приладів у колі з послідовно з'єднаними елементами, результати занести в таблицю 3.

12 Побудувати вольт амперну характеристику електричного кола з послідовно з'єднаними елементами $U_{носл}(I)$ в тих же осях (пункт 8) і порівняти його з розрахунковою ВАХ $U_I(I)$ при послідовному їхньому з'єднанні (експериментальна ВАХ при послідовному з'єднанні).

13 Визначити похибку напруги для робочої сили струму, вказаної викладачем, між аналітичною ВАХ і експериментальною ВАХ при послідовному з'єднанні за рівнянням

$$\varepsilon_{U\%} = \frac{U_{\text{аналіт}} - U_{\text{експер}}}{U_{\text{аналіт}}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Таблиця 3 – Результати експериментальних досліджень ВАХ з послідовно з'єднаними елементами $U_{\text{посл}}(I)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів								
Вимикач QS_1 у положенні «2», вимикач QS_2 розімкнений	$U_{\text{посл}}, \text{ В}$	0							
	$I_{\text{посл}}, \text{ А}$								

14 Використовуючи ВАХ елементів електричного кола лампи розжарювання $U_{\text{л}}(I)$ і резистора $U_{\text{р}}(I)$ в цих же осях побудуйте ВАХ всього кола $U_2(I)$ при паралельному їхньому з'єднанні.

15 Включити перемикач S_1 у положення «1» і включити вимикач S_2 для дослідження кола з паралельно з'єднаними елементами.

16 Змінюючи напругу за допомогою регулятора напруги від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1А, зняти показання приладів у колі з паралельно з'єднаними елементами, результати занести в таблицю 4.

17 Побудувати експериментальну ВАХ електричного кола з паралельно з'єднаними елементами $U_{\text{парал}}(I)$ в тих же осях (пункт 14) і порівняти його з аналітичною ВАХ $U_2(I)$ при паралельному їхньому з'єднанні.

18 Визначити похибку сили струму для робочої напруги, вказаної викладачем, між аналітичною ВАХ і експериментальною ВАХ (пункт 17) при паралельному з'єднанні за рівнянням

$$\varepsilon_I = \frac{I_{\text{аналіт}} - I_{\text{експер}}}{I_{\text{аналіт}}} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Таблиця 4 – Результати експериментальних досліджень ВАХ з паралельно з'єднаними елементами $U_{\text{парал}}(I)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів								
Вимикач QS_1 у положенні «1», вимикач QS_2 замкнений	U_I , В	0							
	I_I , А								

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Мета лабораторної роботи.
- 3 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 4 Розрахункові схеми електричного кола експериментальної установки.
- 5 Графіки ВАХ елементів електричного кола і електричного кола з послідовно і паралельно з'єднаними елементами.
- 6 Таблиця 1.
- 7 Таблиця 2.

8 Таблиця 3.

9 Таблиця 4.

10 Висновок щодо особливостях побудови ВАХ кола при послідовному і паралельному з'єднанні нелінійних елементів.

Контрольні запитання

1. Що називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ) елемента?
2. Які елементи електричного кола називаються лінійними?
3. Які елементи електричного кола називаються нелінійними?
4. Яке з'єднання елементів кола називають послідовним?
5. Яке з'єднання елементів кола називають паралельним?
6. Наведіть алгоритм побудови ВАХ електричного кола при послідовно з'єднаних нелінійних резисторах, якщо задані у вигляді таблиці вольт-амперні характеристики елементів кола.
7. Наведіть алгоритм побудови ВАХ електричного кола при паралельно з'єднаних нелінійних резисторах, якщо задані у вигляді таблиці вольт-амперні характеристики елементів кола.
8. Як визначити силу струму електричного кола при послідовно з'єднаних нелінійних резисторах, якщо задані ВАХ елементів ЕРС джерела?
9. Як визначити напругу на затискачах електричного кола при паралельно з'єднаних нелінійних резисторах, якщо задані у вигляді таблиці ВАХ елементів кола і силу струму ЕРС в нерозгалуженій частині кола?

Список літератури

1. Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.

2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Ч.1. /Л.А. Бессонов. – М.: Высш. Шк., 1978. – 517 с.
- 4 Попова І.О. Тематичний робочий зошит для лабораторних занять з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки, частина 1». Тема 13 «Нелінійні кола постійного струму» /І.О. Попова. – Мелітополь : ТДАТУ, 2016. – 27 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРОЗГАЛУЖЕНИХ МАГНІТНИХ КІЛ ПРИ ПОСТІЙНИХ МАГНІТНИХ ПОТОКАХ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при вивченні фізичних явищ, що мають місце у магнітному колі і величин, які характеризують магнітне кола при постійних магнітних потоках.

Основні теоретичні відомості

Явище електромагнетизму: навколо провідника зі струмом утворюється магнітне поле. Магнітне поле розглядають як стан середовища, яке оточує провід з електричним струмом. Воно створюється завдяки руху заряджених часток: електронів або іонів. Напрямок силових ліній магнітного поля визначається за правилом «буравчика» або «правового гвинта»: якщо угвинчувати буравчик (правий гвинт) за напрямом електричного струму, то напрям його обертання буде збігатися з напрямом силових ліній магнітного поля (рисунок 1).

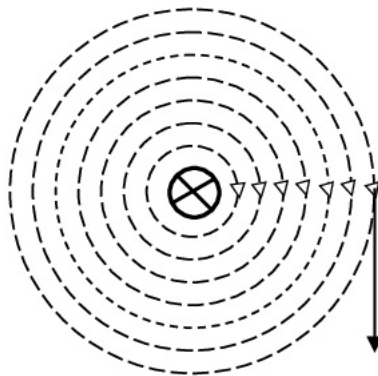


Рисунок 1 – Визначення напрямку силових ліній магнітного поля за правилом «буравчика»

Силова характеристика магнітного поля – **магнітна індукція B** . Вектор магнітної індукції в будь-якій точці магнітного поля є дотична силовій лінії магнітного поля. За модулем магнітна індукція дорівнює відношенню обертаючого моменту рамки зі струмом (поміщеної в дану точку поля) до добутку площі рамки на силу струму в ній

$$B = \frac{M}{I \cdot S}, \quad (1)$$

де B – магнітна індукція, Тл;
 M – обертаючий момент, Н·м;
 I – сила струму, А;
 S – площа рамки, м².

Однорідне магнітне поле – це поле, у якого магнітна індукція в будь-якій точці поля однакова.

Для однорідного магнітного поля введено поняття **магнітного потоку**, під яким розуміється добуток магнітної індукції на площу, через яку проходить магнітне поле

$$\Phi = B \cdot S, \quad (2)$$

де Φ – магнітний потік, Вб;
 B – магнітна індукція, Тл;
 S – площа, через яку проходить магнітне поле, м².

Зв'язок між магнітним потоком, який створюється котушкою зі струмом та силою електричного струму встановлює **закон**

електромагнетизму: поточозчеплення (добуток кількості витків котушки на магнітний потік) прямо пропорційно добутку індуктивності котушки на силу електричного струму

$$\psi = w\Phi = LI, \quad (3)$$

де ψ – поточозчеплення, Вб;

w – кількість витків котушки;

Φ – магнітний потік, Вб;

L – індуктивність котушки, Гн;

I – сила електричного струму, А.

Якщо провід з електричним струмом помістити в різні середовища, то в кожному середовищі значення магнітної індукції буде різним (рисунку 2).

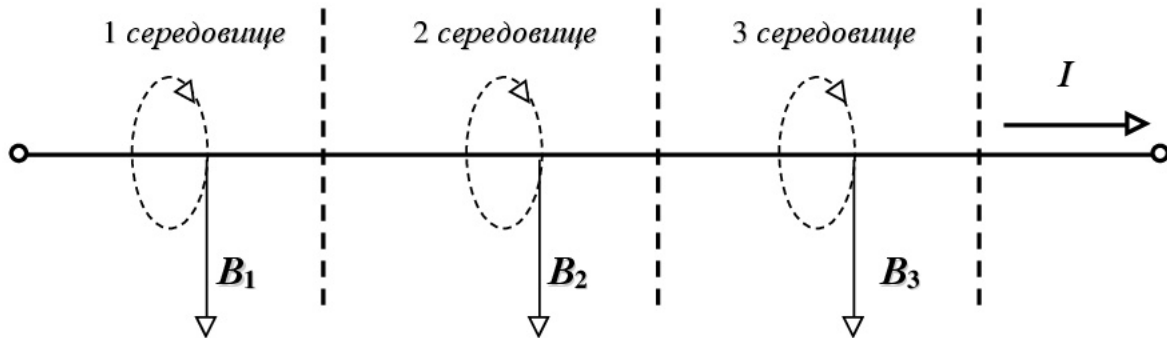


Рисунок 2 – Залежність значення магнітної індукції від середовища

Введемо поняття **напруженості магнітного поля**, під яким розуміється відношення магнітної індукції до магнітної проникності середовища

$$H = \frac{B}{\mu_c}, \quad (4)$$

де H – напруженість магнітного поля, A/m ;

B – магнітна індукція, $Tл$;

μ_c – магнітна проникність середовища, $Гн/м$.

Магнітна проникність середовища може бути знайдена так

$$\mu_c = \mu \mu_0, \quad (5)$$

де μ_c – магнітна проникність середовища, $Гн/м$;

μ – відносна магнітна проникність середовища;

μ_0 – магнітна постійна, $Гн/м$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Гн/м$.

За аналогією з електричним колом під **магнітним колом** розуміється **сукупність пристроїв, які забезпечують можливість створення магнітного потоку**.

Магнітне коло містить магнітопровід (призначений для замикання і підсилення магнітного потоку), а також котушку, виконану з проводу (призначену для створення магнітного потоку), яка живиться від джерела постійного електричного струму. Магнітопроводи виконуються з феромагнітних матеріалів та можуть мати різні довжини і перетини, а також повітряні прошарки. Феромагнітні матеріали – це залізо, нікель, кобальт, їх сплави. Приведемо приклад конструктивної схеми нерозгалуженого магнітного кола (рисунку 3).

Магнітопровід містить дві ділянки: 1-а ділянка довжиною l_1 , перетином S_1 ; 2-а ділянка довжиною l_2 , перетином S_2 . Котушка містить кількість витків w . До котушки підведена напруга U , під дією якої протікає

намагнічуючий струм I . В результаті буде спостерігатися явище електромагнетизму: котушка з намагнічуючим струмом I створить магнітний потік Φ .

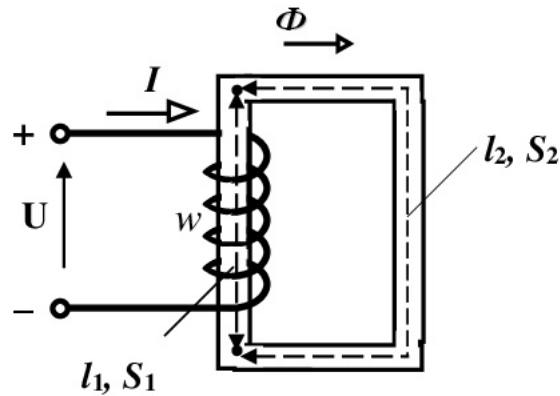


Рисунок 3 – Конструктивна нерозгалуженого магнітного кола

Для однорідного магнітного поля відомий **закон повного струму**: намагнічуюча сила (добуток кількості витків котушки на силу струму) прямо пропорційна добутку напруженості магнітного поля на довжину магнітопроводу

$$F = w I = H l , \quad (6)$$

де F – намагнічуюча сила котушки, A ;

w – кількість витків котушки;

I – сила струму, який протікає в котушці, A ;

H – напруженість магнітного поля, A/m ;

l – довжина магнітопроводу котушки, m .

З рівняння (6) можна знайти залежність напруженості магнітного поля від намагнічуючого струму:

$$H = \frac{w \cdot I}{l}. \quad (7)$$

Якщо по котушці пропускати електричний струм, змінюючи силу електричного струму від нуля до певного значення, то відповідно до виразу (4) буде змінюватися і магнітна індукція за законом:

$$B = \mu_c H. \quad (8)$$

Магнітний потік буде змінюватися за законом:

$$\Phi = \mu_c H S. \quad (9)$$

З курсу фізики відомо, що з ростом магнітного потоку у феромагнетику його магнітна проникність буде зменшуватися. Тому залежність

$\Phi = f(H)$ або $B = f(H)$ буде нелінійною. Така крива називається **кривою намагнічування** (рисунку 4), яка вперше була експериментально встановлена для м'якого заліза російським фізиком *Олександром Григоровичем Столетовим* у 1871 році.

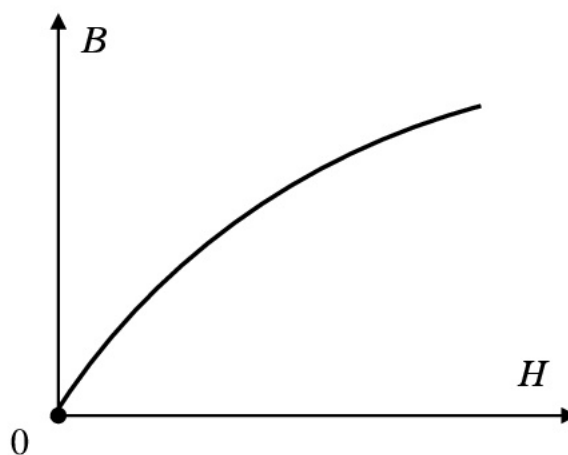


Рисунок 4 – Крива намагнічування $B = f(H)$

Як видно з кривої намагнічування на рисунку 4 з ростом напруженості поступово настає насичення феромагнітного матеріалу і магнітна індукція далі практично не зростає

Між електричним і магнітним колами можна провести формальну аналогію.

Запишемо рівняння для магнітного кола (рис.33) за законом повного струму для однорідного магнітного поля

$$wI = H_1 l_1 + H_2 l_2, \quad (10)$$

де H_1 і H_2 – відповідно напруженості магнітного поля на першій і другій ділянках, A/m ;

l_1 і l_2 – відповідно довжини першої і другої ділянок, m .

Підставимо в рівняння (10) напруженість магнітного поля з виразу (4): як відношення магнітної індукції до магнітної проникності середовища. В результаті одержимо

$$wI = \frac{B_1}{\mu_{c1}} l_1 + \frac{B_2}{\mu_{c2}} l_2, \quad (11)$$

де B_1 і B_2 – магнітні індукції на першій і другій ділянках, $Tл$;

μ_{c1} і μ_{c2} – магнітні проникності першої і другої ділянок, $Гн/м$.

Запишемо в рівнянні (11) магнітні індукції через магнітний потік і перетин ділянки на підставі формули (2):

$$wI = \Phi \frac{l_1}{\mu_{c1} S_1} + \Phi \frac{l_2}{\mu_{c2} S_2} . \quad (12)$$

Введемо поняття **магнітного опору** ділянки магнітного кола:

$$R_M = \frac{l}{\mu_c S} , \quad (13)$$

де l – довжина ділянки, m ;

S – площа поперечного перерізу ділянки, m^2 ;

μ_c – магнітна проникність ділянки магнітопроводу, Hn/m .

Перепишемо вираз (12) з урахуванням (13) у наступному вигляді:

$$R_{M1} \cdot \Phi + R_{M2} \Phi . \quad (14)$$

Введемо поняття **магнітної напруги** на ділянці магнітного кола

$$U_M = R_M \Phi . \quad (15)$$

Введемо поняття **намагнічуючої (магніторушійної) сили**, під яким будемо розуміти добуток кількості витків обмотки на силу струму в ній

$$F = wI . \quad (16)$$

Перепишемо вираз (14) з урахуванням (15) і (16). В результаті одержимо наступне

$$F = U_{M1} + U_{M2}. \quad (17)$$

Таким чином, між електричними і магнітними колами існує наступна формальна аналогія, яка наведена в таблиці 1.

За аналогією з розрахунковими схемами електричного кола складаються розрахункові схеми магнітного кола. Наприклад, для магнітного кола, приведенного на рисунку 3, розрахункова схема має вигляд, представлений на рисунку 5.

Таблиця 1 – Аналогія між фізичними величинами електричного і магнітного поля

Електричні величини	Магнітні величини
E – електрорушійна сила	F – магніторушійна сила
R – опір електричному струму	R_M – опір магнітному потоку
I – сила електричного струму	Φ – магнітний потік
U – напруга на ділянці кола	U_M – магнітна напруга на ділянці кола

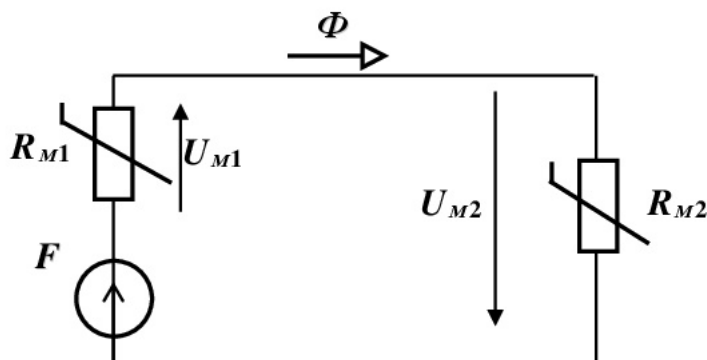


Рисунок 5 – Розрахункова схема магнітного кола

На даній схемі позначені наступні величини:

F – намагнічуюча сила або магніторушійна сила (МРС), A ;

R_{M1} , R_{M2} – магнітні опори ділянок кола, $1/\Gamma\text{н}$;

U_{M1} , U_{M2} – магнітні напруги на ділянках кола, A ;

Φ – магнітний потік, $B\text{б}$.

За аналогією з електричним колом запишемо рівняння за законами Ома для даного магнітного кола.

Закон Ома для ділянки магнітного кола без джерела МРС формулюється так: магнітний потік прямо пропорційний магнітній напрузі на ділянці кола і зворотно пропорційний магнітному опору ділянки кола.

Математичний запис закону

$$\Phi = \frac{U_M}{R_M}, \quad (18)$$

де Φ – магнітний потік на ділянці кола, $B\text{б}$;

U_M – магнітна напруга на ділянці кола, A ;

R_M – магнітний опір ділянки кола, $1/\Gamma\text{н}$.

Наприклад, для ділянки розгалуженого магнітного кола (рисунок 5) з магнітним опором R_{M1} даний вираз буде виглядати так

$$\Phi_1 = \frac{U_{M1}}{R_{M1}}. \quad (19)$$

Закон Ома для замкненого магнітного кола з джерелом МРС формулюється так: магнітний потік дорівнює відношенню магніторушійної сили до суми магнітних опорів кола.

Математичний запис закону Ома для замкненого магнітного кола

$$\Phi = \frac{F}{\sum R_M}, \quad (20)$$

де Φ – магнітний потік на ділянці кола, Вб;

F – магніторушійна сила, А;

$\sum R_M$ – сума магнітних опорів кола, 1/Гн.

Наприклад, для замкненого магнітного кола з однією МРС і двома ділянками з різним магнітним опором (рисунок 5) даний вираз буде виглядати так

$$\Phi = \frac{F}{R_{M1} + R_{M2}}. \quad (21)$$

Узагальнений закон Ома для магнітного кола виглядає так

$$\Phi = \frac{U_M + \sum F}{\sum R_M}, \quad (22)$$

де U_M – магнітна напруга на затисках кола, А.

$\sum F$ – алгебраїчна сума МРС у замкненому контурі кола, А.

Розрахунок нерозгалуженого магнітного кола (рисунок 6) проводять наступним чином. Нехай для П-подібного магнітопроводу електромагніта задані геометричні розміри, крива намагнічування та значення магнітного потоку. Необхідно визначити намагнічуючий струм, якщо відомо кількість витків w котушки.

Порядок розрахунку:

1. Позначаємо середню магнітну лінію та знаходимо довжину її окремих ділянок $l_1, 2l_{\Pi}, l_2$.

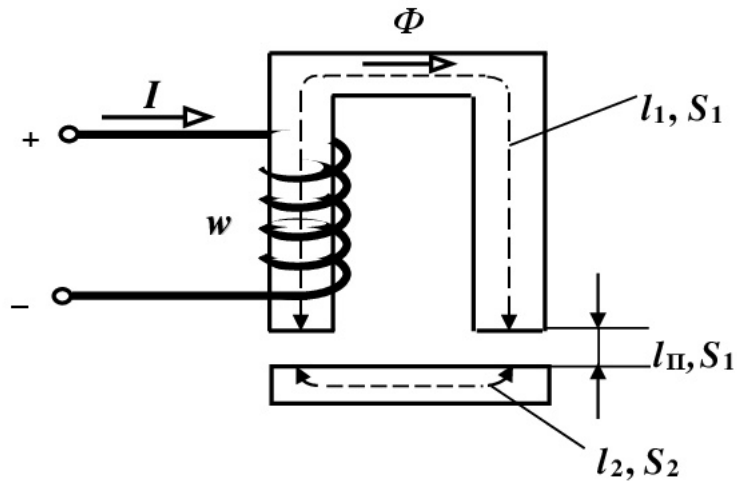


Рисунок 6 – Конструктивна схема П-подібного

2. Складаємо еквівалентну розрахункову схему магнітного кола (рисунок 7).

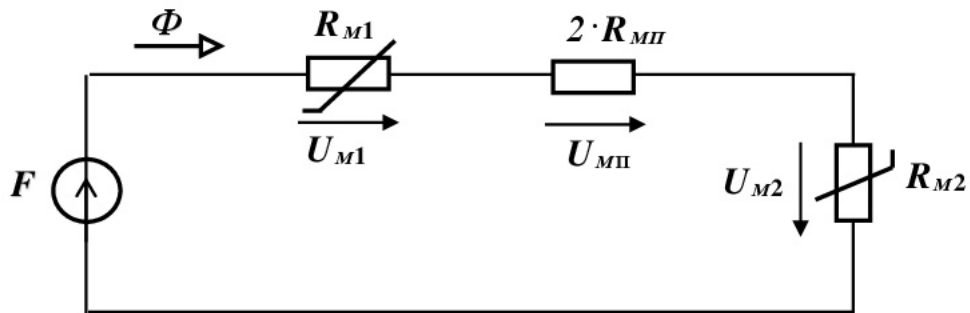


Рисунок 7 – Розрахункова схема П-подібного
магнітопроводу

3. Записуємо рівняння за другим законом Кірхгофа

$$F = R_{M1} \Phi + 2 \cdot R_{M\Pi} \Phi + R_{M2} \Phi = H_1 l_1 + 2H_{\Pi} l_{\Pi} + H_2 l_2 = w I ,$$

звідки

$$I = \frac{H_1 l_1 + 2H_{\Pi} l_{\Pi} + H_2 l_2}{w}.$$

4. Будуємо криву намагнічування (рисунок 8)

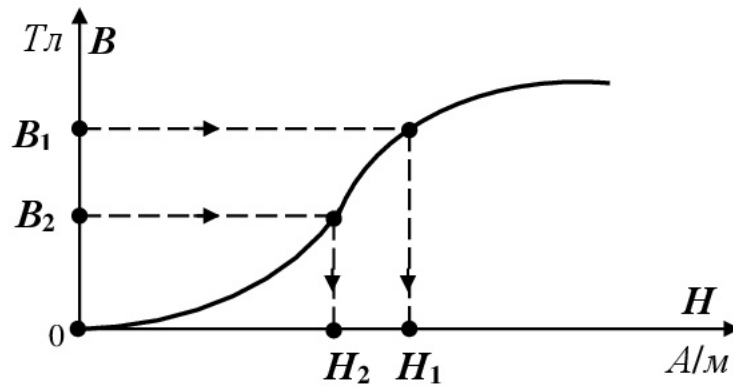


Рисунок 8 – Крива намагнічування Π -подібного магнітопроводу

5. Визначаємо магнітні індукції B_1 та B_2 на окремих ділянках кола

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}.$$

6. За допомогою кривої намагнічування визначаємо напруженості магнітного поля H_1 та H_2 на окремих ділянках кола.

7. Визначаємо напруженість поля в повітряному прошарку

$$H_{\Pi} = \frac{B_{\Pi}}{\mu_{\Pi}}; \quad \mu_{\Pi} \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Підставляємо знайдені значення напруженостей H_1 , H_2 та H_{Π} і визначаємо намагнічуючий струм I .

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Опрацювати теоретичний матеріал за темою 14 «Нелінійні кола постійного струму [1: с.169-170], [2: с.418-420], [3: с.346-352].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 14.1-14.2 [4].
- 3 Виконати тестові контрольні завдання для самоаналізу додатку В.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.
- 2 Зібрати схему експериментальної установки.
- 3 Провести експеримент і записати результати дослідження в таблицю 2.
- 4 Провести розрахунки і записати результати розрахунків фізичних величин, що характеризують магнітне коло в таблицю 3.
- 5 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті

виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему магнітного кола та пояснити її.
- 3 Уміти за допомогою експериментальних даних дослідити магнітне коло.
- 4 Уміти за допомогою експериментальних даних визначити фізичні величини магнітного кола.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить ідеальний генератор постійного струму G , з'єднувальні проводи та котушку K з феромагнітним осердям,

для якої відомі кількість витків w та індуктивність L , амперметр PA вимикач QS_I .

Принципова електрична схема експериментальної установки котушки індуктивності K з феромагнітним осердям наведена на рисунку 9.

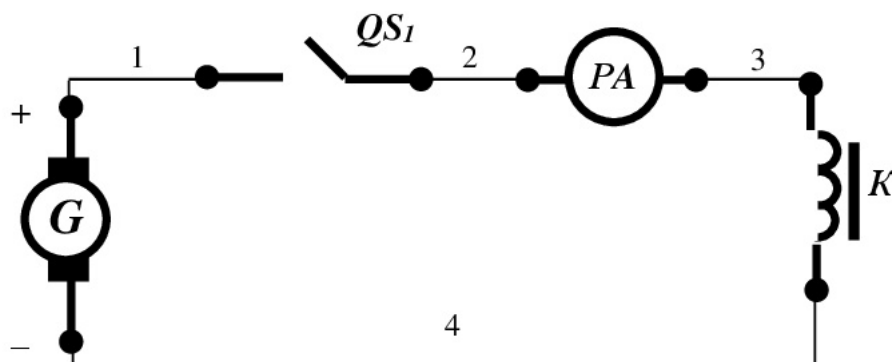


Рисунок 9 - Принципова електрична схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 4 провідника (на схемі позначені номерами 1-4).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;

- опір обмотки амперметра дорівнює нулю;

Розрахункова схема магнітного кола експериментальної установки при включенні вимикача QS_I , наведена на рисунку 10.

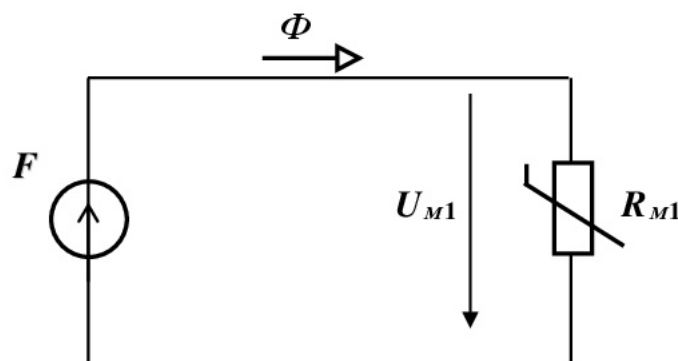


Рисунок 8 – Розрахункова схема магнітного кола експериментальної установки

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

R_{M1} – магнітний опір резистора, $1/\Gamma\text{н}$;

F – магніторушійна сила, А;

Φ – магнітний потік, Вб;

U_{M2} – спадання магнітної напруги, А.

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.
- 3 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	w	$L, \Gamma\text{н}$	$I, \text{А}$
Вимикач QS_I замкнений			

- 4 Визначити за допомогою експериментальних даних магнітний потік усередині котушки, використовуючи рівняння закону електромагнетизму

$$w \cdot \Phi = L \cdot I . \quad (23)$$

5 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних потокозчеплення котушки, використовуючи закон електромагнетизму

6 Визначити за допомогою експериментальних даних намагнічуючу силу котушки, використовуючи рівняння (16):

7 Визначити за допомогою експериментальних даних енергію магнітного поля котушки, використовуючи рівняння

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2} . \quad (24)$$

8 Занести отримані значення в таблицю 3.

Таблиця 3 Результати розрахунків фізичних величин магнітного кола

Фізичні величини, що характеризують магнітне коло			
Φ , Вб	ψ , Вб	F , А	W , Дж

Зміст звіту

1 Назва лабораторної роботи.

2 Мета лабораторної роботи.

3 Принципова електрична схема експериментальної установки.

4 Розрахункова схема магнітного кола експериментальної установки.

6 Таблиця 2.

7 Таблиця 3.

8 Висновок щодо матеріалу магнітопроводу електричних машин.

Контрольні запитання

- 1 У чому суть явища електромагнетизму?
- 2 Сформулюйте правило «правого буравчика».
- 3 Дайте визначення магнітної індукції.
- 4 Запишіть визначальну формулу магнітної індукції.
- 5 Що таке однорідне магнітне поле?
- 6 Дайте визначення магнітного потоку для однорідного магнітного поля.
- 7 Сформулюйте закон електромагнетизму і запишіть математичний вираз.
- 8 Дайте визначення напруженості магнітного поля.
- 9 Запишіть визначальну формулу напруженості магнітного поля.
- 10 Як визначити магнітну проникність середовища?
- 11 Що таке магнітна постійна? Чому вона дорівнює магнітна постійна?
- 12 Сформулюйте закон повного струму для однорідного магнітного поля.
- 13 Що розуміється під намагнічуючою силою? Як її визначити?
- 14 Як формулюється закон Ома для ділянки магнітного кола без МРС?
- 15 Сформулюйте закон Ома для ділянки магнітного кола з декількома МРС?
- 16 Як формулюється узагальнений закон Ома для магнітного кола?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Ч.1. /Л.А. Бессонов. – М.: Высш. Шк., 1978. – 517 с.
- 3 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3

курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання
з теми 14 «Магнітні кола при постійних магнітних потоках». / І.О. Попова.
– Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 32 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНИХ МАГНІТНИХ КІЛ ПРИ ПОСТІЙНИХ МАГНІТНИХ ПОТОКАХ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при складанні розрахункової схеми розгалуженого магнітного кола і вміти зробити розрахунок розгалуженого магнітного кола при постійних магнітних потоках з використанням законів Кірхгофа

Основні теоретичні відомості

Розглянемо розгалужене магнітне коло (рисунок 1).

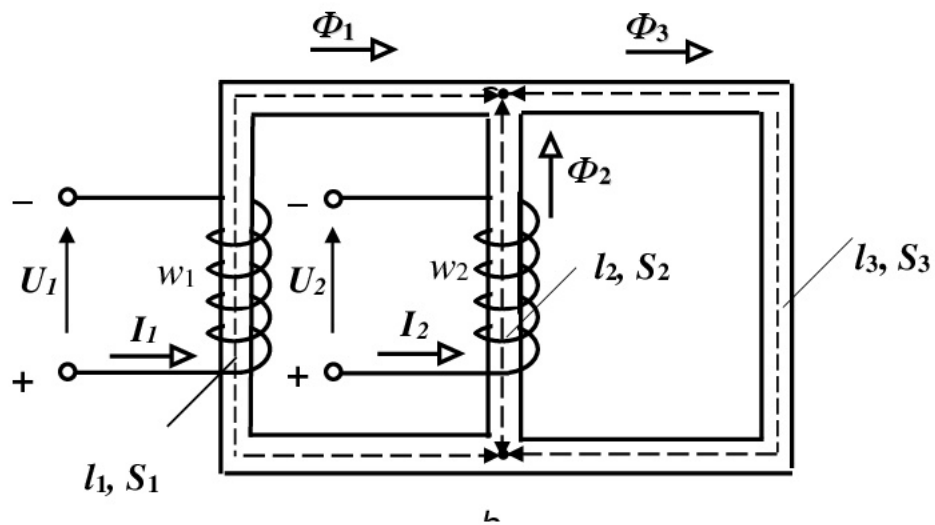


Рисунок 1 – Конструктивна схема розгалуженого магнітного кола

Складемо розрахункову схему даного розгалуженого магнітного кола (рисунок 2).

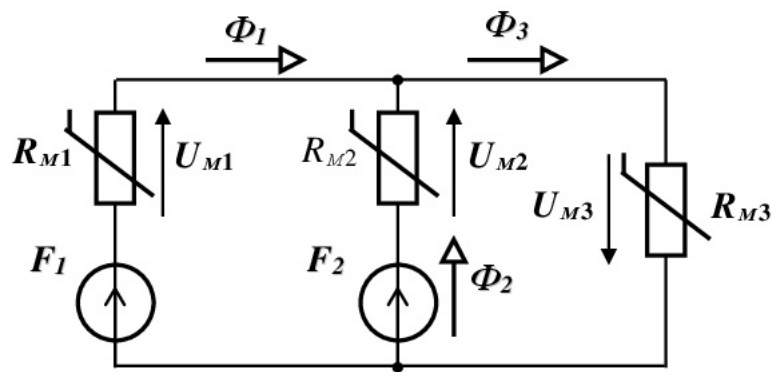


Рисунок 2 – Розрахункова схему розгалуженого магнітного кола

Перший закон Кірхгофа для розгалуженого магнітного кола формулюється так: алгебраїчна сума магнітних потоків у вузлі кола дорівнює нулю. При цьому магнітні потоки, що входять у вузол, записуються зі знаком «плюс», а магнітні потоки, що виходять з вузла, записуються зі знаком «мінус».

Математичний запис першого закону Кірхгофа:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0. \quad (1)$$

Наприклад, для вузла *a* розгалуженого магнітного кола (рис.2), даний вираз буде виглядати так:

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0. \quad (2)$$

Другий закон Кірхгофа для замкненого контуру магнітного кола формулюється так: алгебраїчна сума магніторухілих сил у контурі дорівнює алгебраїчній сумі добутків магнітних опорів (які входять у контур) на магнітний потік (який протікає в даних опорах).

Математичний запис другого закону Кірхгофа:

$$\sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n R_{Mi} \Phi_i . \quad (3)$$

Наприклад, для замкненого контуру розгалуженого магнітного кола (рис.2) з магнітними опорами R_{M1} , R_{M2} та джерелами магніторушійних сил F_1 , F_2 , даний вираз буде виглядати так:

$$F_1 - F_2 = R_{M1} \Phi_1 - R_{M2} \Phi_2. \quad (4)$$

Розрахунок розгалужених магнітних кіл проводять наступним чином.

Для заданого магнітного кола (рис.3) відомі геометричні розміри магнітопроводу, крива намагнічування, магнітний потік Φ_3 . Необхідно знайти намагнічуючу силу F .

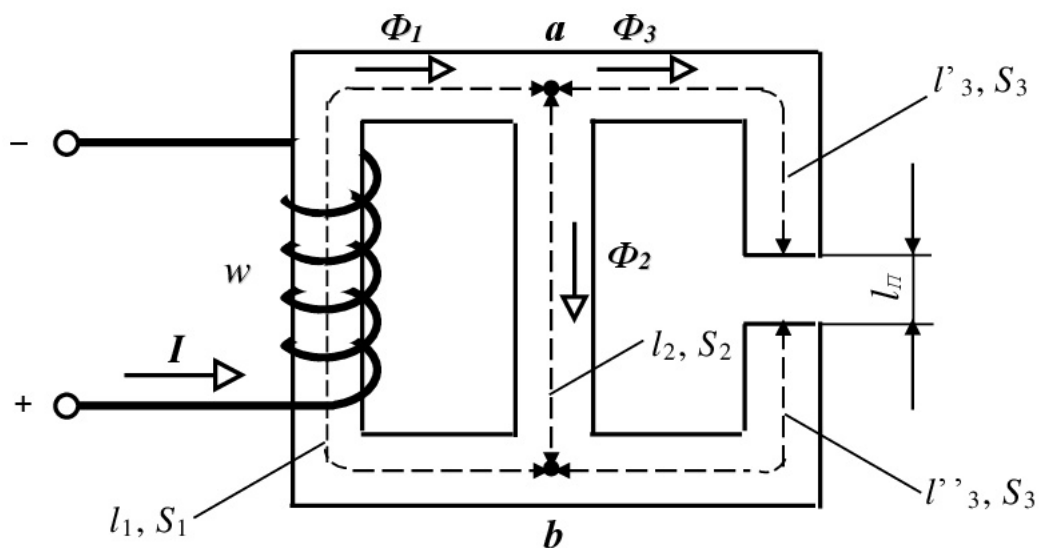


Рисунок 3 – Конструктивна схема розгалуженого магнітного кола

Порядок розрахунку:

1. Складаємо еквівалентну розрахункову схему магнітного кола і вибираємо умовно позитивні напрями магнітних потоків (рис.3).

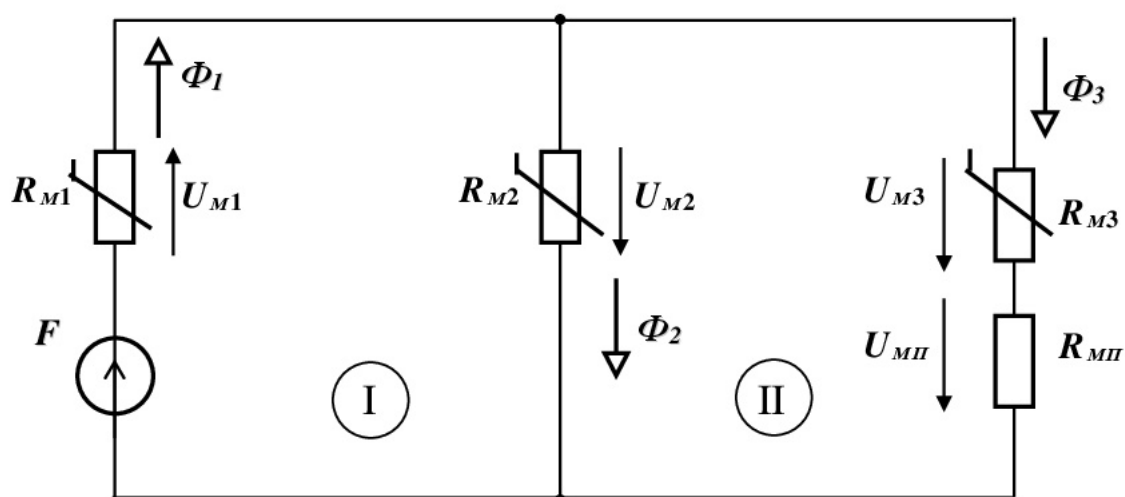


Рисунок 4 – Еквівалентна розрахункова схема
розгалуженого магнітного кола рисунку 3

2. Для визначення намагнічуючої сили запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для першого контуру

$$F = R_{M1}\Phi_1 + R_{M2}\Phi_2 \quad \text{або} \quad F = H_1 l_1 + U_{M.ab}.$$

Таким чином, задача зводиться до визначення H_1 та $U_{M.ab}$.

3. Магнітна напруга на ділянці ab :

$$U_{M.ab} = R_{M3}\Phi_3 + R_{M\Pi}\Phi_3 = H_3 l_3 + H_{\Pi} l_{\Pi},$$

де

$$l_3 = l'_3 + l''_3.$$

Знаючи Φ_3 , визначаємо $B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3}$, а потім за допомогою кривої намагнічування знаходимо H_3 . Оскільки $H_{\Pi} = \frac{B_3}{\mu_0}$, то підставивши значення, знаходимо $U_{M.ab}$.

4. Напруженість H_1 знаходимо за допомогою кривої намагнічування, визначивши спочатку магнітну індукцію $B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1}$. Магнітний потік $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$. При цьому $\Phi_2 = B_2 S_2$. Для визначення магнітної індукції B_2 спочатку знаходимо напруженість магнітного поля на ділянці l_2 , скориставшись законом Ома

$$U_{M.ab} = R_{M2} \Phi_2 = H_2 l_2 .$$

звідки

$$H_2 = \frac{U_{M.ab}}{l_2} .$$

За допомогою кривої намагнічування знаходимо магнітну індукцію B_2 та розраховуємо магнітний потік Φ_2 . Після чого визначаємо магнітну індукцію B_1 за формулою $B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1}$ та напруженість H_1 за допомогою кривої намагнічування.

5. За знайденими значеннями розраховуємо намагнічуючу силу F .

Нехай тепер задані всі геометричні розміри магнітопроводу, крива намагнічування і намагнічуюча сила. Необхідно знайти всі магнітні потоки в розгалуженнях кола.

Порядок розрахунку:

1. Складаємо розрахункову схему кола і вибираємо умовно позитивні напрями магнітних потоків.

2. Для вузла a записуємо рівняння за першим законом Кірхгофа

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0 .$$

або

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 .$$

3. Оскільки коло нелінійне, задачу вирішуємо графо-аналітичним методом. Для цього спочатку будуємо допоміжні характеристики $\Phi_1 = f(U_{M.ab})$; $\Phi_2 = f(U_{M.ab})$; $\Phi_3 = f(U_{M.ab})$.

3.1. Для першого розгалуження за законом Ома можемо записати

$$\Phi_1 = \frac{(\varphi_{M.a} - \varphi_{M.b}) + F}{R_{M1}} = \frac{-U_{M.ab} + F}{R_{M1}} ,$$

звідки

$$U_{M.ab} = F - R_{M1}\Phi_1 = F - H_1 l_1 .$$

Щоб побудувати допоміжну характеристику $\Phi_1 = f(U_{M.ab})$, задаємося кількома значеннями магнітної індукції B_1 , визначаємо за допомогою кривої намагнічування напруженість магнітного поля H_1 , потім магнітну напругу $U_{M.ab}$ та відповідні значення магнітного потоку Φ_1 .

3.2. Для другого розгалуження за законом Ома можемо записати

$$\Phi_2 = \frac{\varphi_{M.a} - \varphi_{M.b}}{R_{M2}} = \frac{U_{M.ab}}{R_{M2}},$$

звідки

$$U_{M.ab} = R_{M2} \Phi_2 = H_2 l_2.$$

Щоб побудувати допоміжну характеристику $\Phi_2 = f(U_{M.ab})$, задаємося кількома значеннями магнітної індукції B_2 , визначаємо за допомогою кривої намагнічування напруженість магнітного поля H_2 , потім магнітну напругу $U_{M.ab}$ та відповідні значення магнітного потоку Φ_2 .

3.3. Для третього розгалуження за законом Ома можемо записати:

$$\Phi_3 = \frac{\varphi_{M.a} - \varphi_{M.b}}{R_{M3} + R_{M.\Pi}} = \frac{U_{M.ab}}{R_{M3} + R_{M.\Pi}},$$

звідки

$$U_{M.ab} = R_{M3} \Phi_3 + R_{M.\Pi} \Phi_3.$$

або

$$U_{M.ab} = H_3 l_3 + H_{\Pi} l_{\Pi}.$$

Залежності $\Phi_1 = f(U_{M.ab})$, $\Phi_2 = f(U_{M.ab})$ наносимо на одну площину (рисунок 6).

Щоб побудувати допоміжну характеристику $\Phi_3 = f(U_{M.ab})$, задаємося кількома значеннями магнітної індукції B_3 , визначаємо за допомогою кривої намагнічування напруженість магнітного поля H_3 , потім магнітну напругу $U_{M.ab}$ та відповідні значення магнітного потоку Φ_3 залежність $\Phi_3 = f(U_{M.ab})$ будуємо на рисунку .

За першим законом Кірхгофа $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$. Тому будуємо допоміжну характеристику $\Phi_2 + \Phi_3 = f(U_{M.ab})$. Точка перетинання a кривих

$\Phi_1 = f(U_{M.ab})$ та $\Phi_2 + \Phi_3 = f(U_{M.ab})$ визначає магнітну напругу $U_{M.ab}$. Потім визначаємо магнітні потоки Φ_1, Φ_2, Φ_3 .

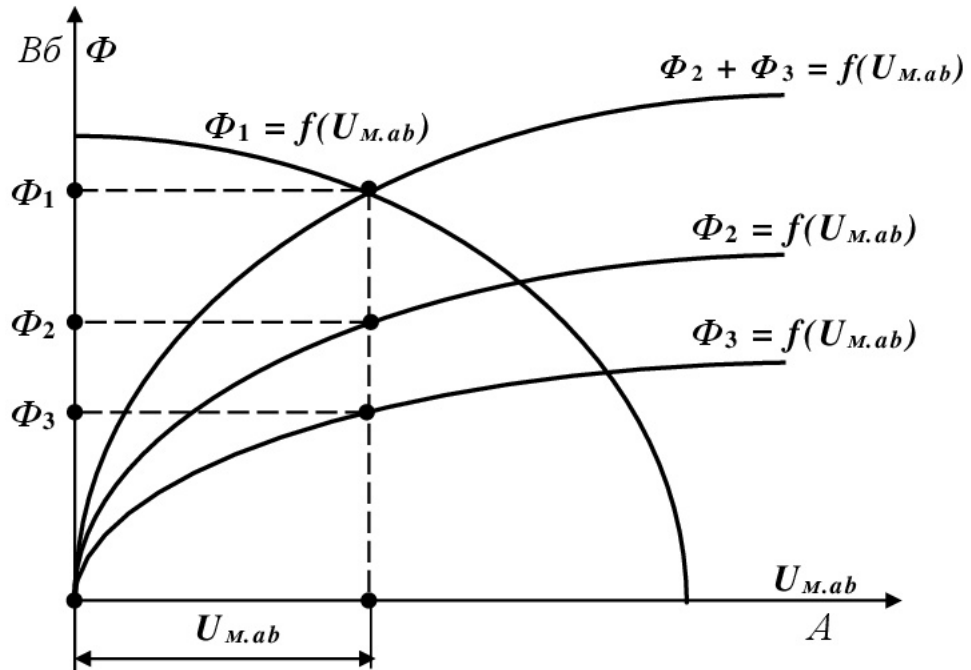


Рисунок 6 – Побудова залежності $\Phi_2 + \Phi_3 = f(U_{M.ab})$ і визначення магнітних потоків

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 14 «Нелінійні кола постійного струму [1: с.174-178], [2: с.421-423] [3: с.42-45].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 14.3-14.4 [4]
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.
- 2 Ознайомитися зі схемою експериментальної установки.

- 3 Скласти конструктивну схему пристрою.
- 4 Скласти розрахункову схему магнітного кола
- 5 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову схему електричного кола пристрою.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему магнітного кола пристрою та пояснити її.
- 3 Уміти за допомогою першого і другого законів Кірхгофа скласти рівняння для розрахунку магнітних потоків у стрижнях.
- 4 Уміти визначити магнітні потоки у стрижнях розгалуженого магнітопроводу за допомогою експериментальних даних, кривої намагнічування, геометричних даних магнітопроводу і котушки.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка містить пристрій, що має Ш-подібну форму магнітопроводу, на стрижні якого знаходиться котушка з кількістю витків w , ідеальний генератор постійного струму G , реостат R_H , амперметр PA і вольтметр PV . Для комутації кола передбачений вимикач QS_1 . Принципова схема експериментальної установки наведена на рисунку 6.

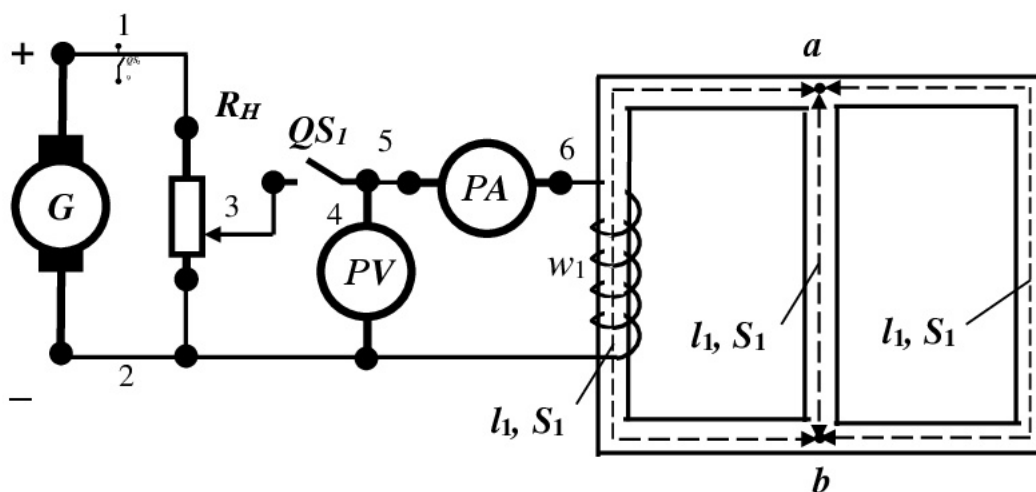


Рисунок 6 – Принципова схема експериментальної установки

На принциповій схемі введені наступні умовні позначення:

R_{M1}, R_{M2}, R_{M3} , – магнітні опори кола, 1/Гн;

F_1 –магніторушійна сила, А;

Φ_1, Φ_2, Φ_3 , – магнітні потоки у стрижнях, Вб;

U_{M1}, U_{M2}, U_{M3} – спадання магнітної напруги на ділянках магнітного кола, А.

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;

Розрахункова схема магнітного кола експериментальної установки наведена на рисунку 7.

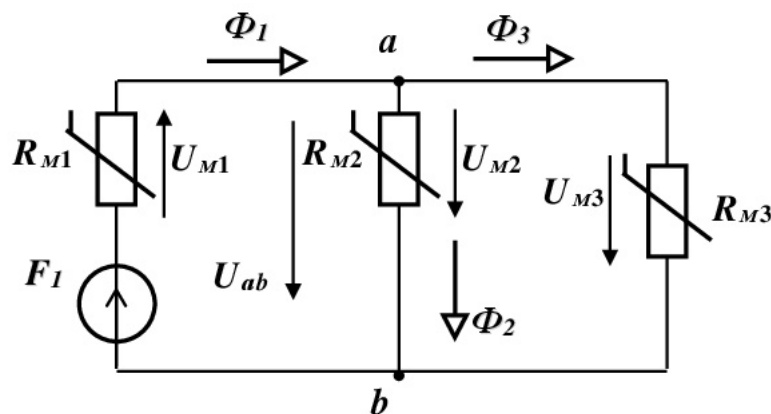


Рисунок 7 – Розрахункова схема магнітного кола експериментальної установки

Порядок виконання роботи

1 Зібрати схему експериментальної установки.

- 2 Включити вимикач QS_1 експериментальної установки.
- 3 Подати напругу на затискачі експериментальної установки при якому струм у електричному колі не перевищує 1А і зняти покази приладів, результати занести в таблицю 1.
- 4 Занести в таблицю 1 довжини середніх магнітних ліній магнітопроводу l_1, l_2, l_3 , значення перерізів стрижнів S_1, S_2, S_3 , і кількість витків котушки w_1 .

Таблиця 1– Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів і розміри магнітопроводу							
Вимикач QS_1 замкнений	I , А	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	S_1 , м ²	S_2 , м ²	S_3 , м ²	w_1

Таблиця 2 – Крива намагнічування магнітопроводу

B	Тл	0	0,22	0,75	1,02	1,28	1,57
H	А/м	0	20	40	80	200	800

- 1 Скласти рівняння $U_{\text{маб1}}$ для ділянки кола з середньою магнітною лінією l_1 за другим законом Кірхгофа.

$$F = H_l \cdot l_l + U_{\text{маб1}} . \quad (5)$$

- 2 Визначити намагнічуючу силу котушки за допомогою експериментальних даних і кількості витків.

3 Визначити магнітний потік Φ_1 у першому стрижні, задавшись значеннями магнітної індукції B (таблиця 2) і перерізом першого стрижня S_1 . Результати розрахунків занести у таблицю 3.

4. Визначити магнітну напругу на магнітному опорі першого стрижня U_{m1} , задавшись значеннями напруженості у магнітопроводі (таблиця 2) і довжиною середньої магнітної лінії l_1

$$U_{m1} = H_1 \cdot l_1. \quad (6)$$

Результати розрахунків занести у таблицю 3.

5 Визначити магнітну напругу U_{ab1} на ділянці кола з середньою магнітною лінією l_1 при різних магнітних напругах першого стрижня U_{m1} , задавшись значеннями таблиця 3 і магніторушійною силою F .

6 Визначити магнітний потік Φ_2 у другому стрижні, задавшись значеннями магнітної індукції B (таблиця 2) і перерізом другого стрижня S_2 . Результати розрахунків занести у таблицю 3.

7 Визначити магнітну напругу U_{ab2} на ділянці кола з середньою магнітною лінією l_2 при різних напруженостях магнітопроводу (таблиця 2). Результати розрахунків занести у таблицю 3.

$$U_{mab2} = U_{m2} = H_2 \cdot l_2. \quad (7)$$

8 Визначити магнітний потік Φ_3 у третьому стрижні, задавшись значеннями магнітної індукції B (таблиця 2) і перерізом третього стрижня S_3 . Результати розрахунків занести у таблицю 3.

9 Визначити магнітну напругу U_{mab3} на ділянці кола з середньою магнітною лінією l_3 при різних напруженостях магнітопроводу (таблиця 2). Результати розрахунків занести у таблицю 3.

$$U_{\text{мab3}} = U_{\text{м3}} = H_3 \cdot l_3. \quad (8)$$

10 Побудувати (в масштабі) в одній площині залежності $\Phi_1 = f(U_{\text{мab1}})$, $\Phi_2 = f(U_{\text{мab2}})$, $\Phi_3 = f(U_{\text{мab3}})$.

11 Побудувати в цій площині залежність $(\Phi_2 + \Phi_3) = f(U_{\text{мab}})$.

12 Позначити точку перетину залежностей $(\Phi_2 + \Phi_3) = f(U_{\text{мab}})$, $\Phi_1 = f(U_{\text{мab1}})$, $\Phi_2 = f(U_{\text{мab2}})$, $\Phi_3 = f(U_{\text{мab3}})$ як робочу точку «Р», через неї провести пряму, паралельну вісі магнітного потоку.

13 Для робочої точки «Р» визначити магнітні потоки у стрижнях Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 . Результати занести у таблицю 4.

Таблиця 3 – Результати розрахунків магнітного кола

B	Тл	0	0,22	0,75	1,02	1,28	1,57
H	А/м	0	20	40	80	200	800
Φ_1	Вб						
$H_1 \cdot l_1$	А/м						
$U_{\text{мab1}}$	А						
Φ_2	Вб						
$U_{\text{мab2}}$	А						
Φ_3	Вб						
$U_{\text{мab3}}$	А						

13 Перевірити результати розрахунків магнітних потоків у стрижнях за першим законом Кірхгофа.

14 Скласти рівняння для незалежних магнітних контурів за другим законом Кірхгофа.

Таблиця 4 – Результати розрахунків магнітного кола

$U_{m\,ab}, A$	$\Phi_1, Bб$	$\Phi_2, Bб$	$\Phi_3, Bб$

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Мета лабораторної роботи.
- 3 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 4 Розрахункова схема магнітного кола експериментальної установки.
- 5 Таблиця 1.
- 6 Таблиця 3.
- 7 Таблиця 4.
- 8 Графічні залежності $\Phi_1 = f(U_{m\,ab1})$, $\Phi_2 = f(U_{m\,ab2})$, $\Phi_3 = f(U_{m\,ab3})$ і $(\Phi_1 + \Phi_2) = f(U_{m\,ab})$, побудовані в одній площині (в масштабі).
- 9 Висновок щодо порядку розрахунку розгалужених магнітних кіл.

Контрольні запитання

- 1 Як формулюється 1-й закон Кірхгофа для розгалуженого магнітного кола?
- 2 Запишіть математично 1-й закон Кірхгофа і вкажіть фізичні величини, що входять до нього.
- 3 Як формулюється 2-й закон Кірхгофа для розгалуженого магнітного кола?

- 4 Запишіть математично і вкажіть фізичні величини, що входять до 2-го закону Кірхгофа.
- 5 Запишіть визначальну формулу напруженості магнітного поля.
- 6 Одержите одиницю напруженості магнітного поля з визначальної формули
- 7 Що розуміється під магніторушійною (намагнічуючою) силою?
- 8 Запишіть визначальну формулу магніторушійної (намагнічуючої) сили.
- 9 Одержите одиницю намагнічуючої сили з визначальної формули.
- 10 Як розрахувати магнітний опір ділянки магнітного кола?
- 11 Одержите одиницю виміру магнітного опору ділянки магнітного кола.
- 12 Що розуміють під магнітною напругою ділянки магнітного кола?
- 13 Одержите одиницю виміру магнітної напруги.
- 14 Чому в розгалужених магнітних колах магнітні потоки визначаються графоаналітичним методом?
- 15 Запишіть визначальну формулу магнітної індукції.
- 16 Запишіть визначальну формулу магнітного потоку для однорідного магнітного поля.
- 17 Чому магнітне поле у стрижні магніто проводі називають однорідним?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. Ч. 2, 3. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1979. – 432 с.
- 4 Попова І.О. Тематичний робочий зошит для лабораторних занять з

дисципліни «Теоретичні основи електротехніки, частина 1». Тема 13
«Нелінійні кола постійного струму» /І.О. Попова. – Мелітополь : ТДАТУ,
2016. – 27 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРЕДДЯМ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при визначенні параметрів ідеальної котушки з феромагнітним осердям з урахуванням петлі гістерезису за експериментальними даними та вивчення фізичних процесів, що протікають в ідеальній котушці з феромагнітним осердям з урахуванням петлі гістерезису.

Основні теоретичні відомості

Підключимо ідеальну котушку з феромагнітним осердям до джерела змінного синусоїдного струму. При цьому будемо вважати, що ідеальна котушка з феромагнітним осердям не має петлі гістерезиса, активний опір проводу і магнітопроводу її дорівнює нулю, магнітний потік розсіювання відсутній (рисунок 1).

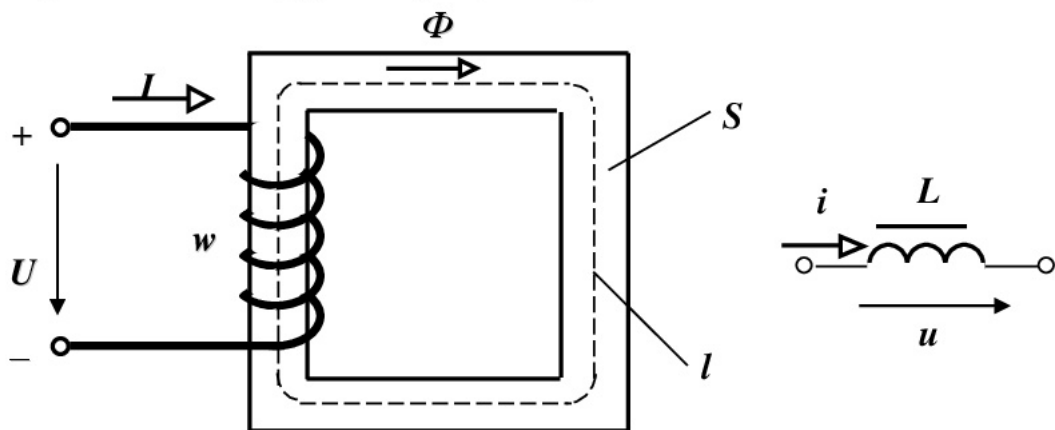


Рисунок 1 – Конструктивна схема та умовно графічне і літерне позначення котушки з феромагнітним осердям

Запишемо основні співвідношення для цього випадку:

$$\Phi = \frac{F}{R_{\mathcal{M}}} = \frac{wi}{R_{\mathcal{M}}}; \quad R_{\mathcal{M}} = \frac{l}{\mu\mu_0 S}; \quad \psi = w\Phi = Li;$$

$$L = \frac{w\Phi}{i} = \frac{w^2}{R_{\mathcal{M}}} = \frac{w^2 \mu\mu_0 S}{l}. \quad (1)$$

Залежність $\Phi(i)$ для котушки з феромагнітним осердям така ж, як і $\Phi(I)$ при постійному струмі, нелінійна (крива намагнічування).

Розглянемо форму кривої струму в колі з нелінійною індуктивністю при синусоїдній напрузі джерела. Припустимо, що напруга джерела

$$u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (2)$$

Зневажаючи активним опором котушки з феромагнітним осердям і магнітним потоком розсіювання, можемо записати:

$$u = -e; \quad e = -w \frac{d\Phi}{dt}; \quad (3)$$

$$U_m \sin(\omega t + 90^\circ) = w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

звідки

$$d\Phi = \frac{U_m}{w} \sin(\omega t + 90^\circ) dt;$$

$$\Phi = \frac{U_m}{\omega w} \sin \omega t = \Phi_m \sin \omega t. \quad (5)$$

Таким чином, при синусоїдній напрузі магнітний потік також синусоїдний.

Для знаходження кривої струму в котушці з феромагнітним осердям, скористаємося залежностями $\Phi(t)$ і $\Phi(i)$ та побудуємо залежність $i(t)$ графічним способом (рис.2).

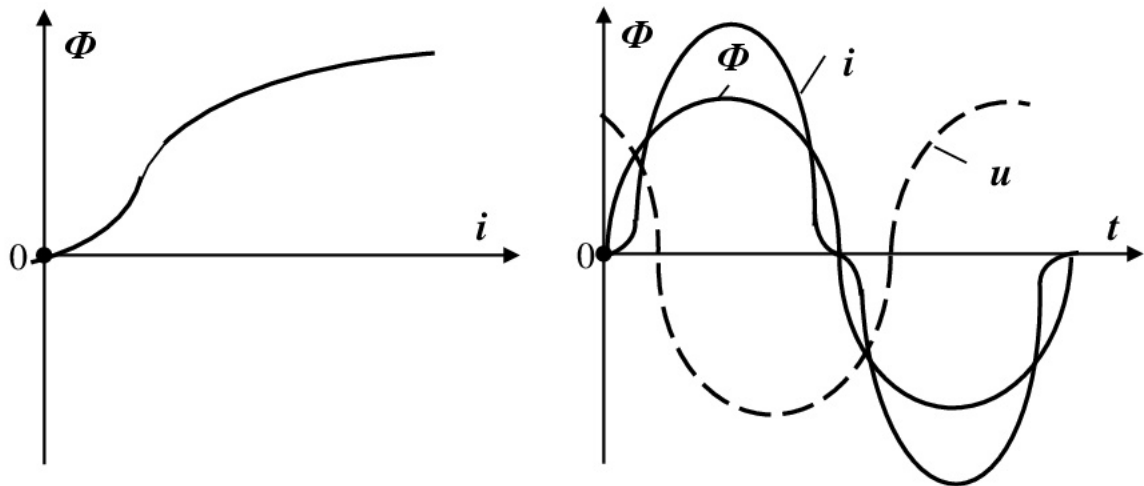


Рисунок 2 – Графічні залежності $\Phi(i)$, $i(t)$, $\Phi(t)$, $u(t)$ в ідеальній котушці з феромагнітним осердям

Отже, крива струму несинусоїдна. Замінімо її еквівалентною синусоїдою

$$i = I_m \sin \omega t ; \quad I_m = \sqrt{2} I , \quad (6)$$

де I – діюче значення несинусоїдного струму, A ;

Рівняння миттєвої електрорушійної сили самоіндукції в котушці з феромагнітним осердям

$$e = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) . \quad (7)$$

Побудуємо векторну діаграму ідеальної котушки з феромагнітним осердям та складемо її схему заміщення (рис. 3).

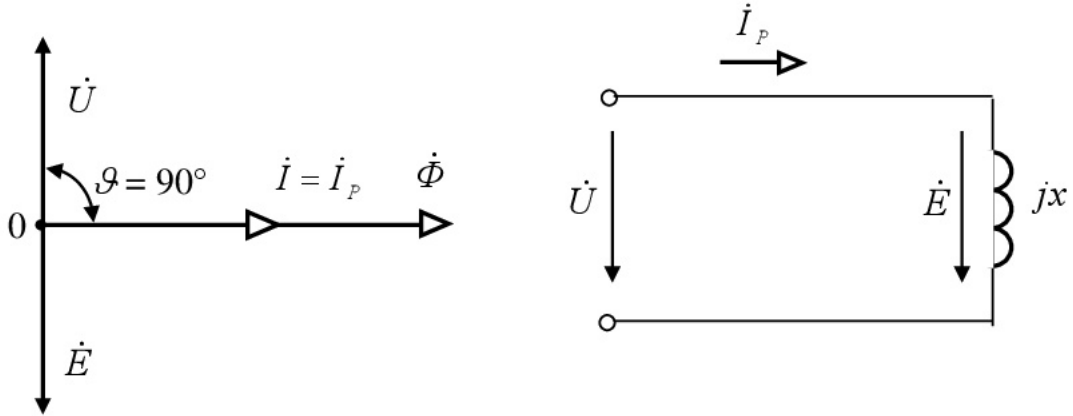


Рисунок 3 – Векторна діаграма і розрахункова схема ідеальної котушки з феромагнітним осердям

Запишемо рівняння для ідеальної котушки з феромагнітним осердям

$$\dot{U} = jx\dot{I}_p, \quad (8)$$

де I_p – реактивний (намагнічуючий) струм, A ;

$x = \omega \cdot L$ – індуктивний опір, $Ом$,

L – еквівалентна індуктивність, $Гн$.

Потокозчеплення котушки

$$\psi = w\Phi = LI_p. \quad (9)$$

Розглянемо тепер котушку з феромагнітним осердям з **урахуванням петлі гістерезису**. Якщо побудувати криву струму в цьому випадку на базі залежностей $\Phi(t)$ і $\Phi(i)$, яка має форму петлі гістерезису, то одержимо несинусоїдну форму кривої струму (рис.4).

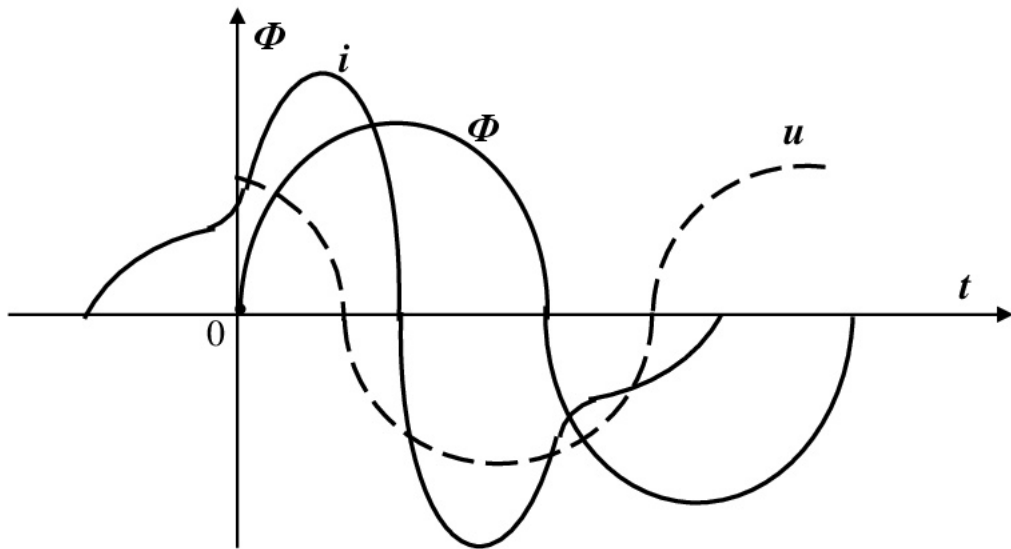


Рисунок 4 – Залежності $i(t)$, $\Phi(t)$, $u(t)$ в ідеальній котушці з феромагнітним осердям з урахуванням петлі гістерезису

Якщо несинусоїдну криву струму замінити еквівалентною синусоїдою, то можна записати вирази миттєвих: напруги сили струму, магнітного потоку і ЕРС самоіндукції ідеальної котушки з феромагнітним осердям з урахуванням петлі гістерезису

$$u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ);$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \delta),$$

(10)

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t;$$

$$e = E_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

де δ – кут втрат у котушці. Дорівнює $\delta = 90^\circ - \varphi$.

Побудуємо векторну діаграму напруги, сили струму, магнітного потоку і ЕРС самоіндукції ідеальної котушки з феромагнітним осердям з урахуванням петлі гістерезису та складемо її розрахункову схему для цього випадку (рисунок 5). На схемі I_a – активна складова струму (втрати на вихрові струми і гістерезис), I_p – реактивна складова струму (основний магнітний потік).

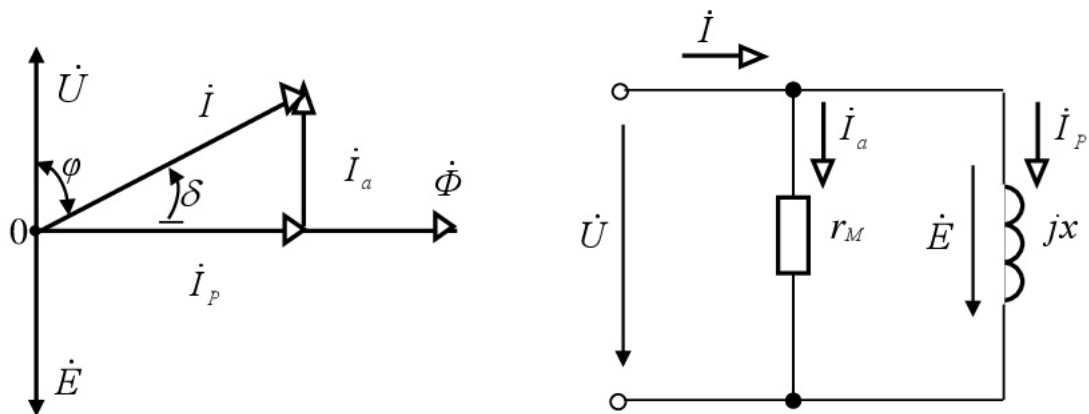


Рисунок 5 – Векторна діаграма та і розрахункова схема ідеальної котушки з феромагнітним осердям

Поява в схемі активного опору r_m (активний опір проводу котушки дорівнює нулю) обумовлена споживанням котушкою з феромагнітним осердям активної потужності, яка втрачається на гістерезис і вихрові струми.

Активна потужність, яку споживає ідеальна котушка, **на гістерезис** дорівнює

$$P_r = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (11)$$

Якщо вважати, що активний опір проводу котушки дорівнює нулю, то прикладена напруга врівноважується ЕРС самоіндукції

$$u = -e = w \frac{d\Phi}{dt} \quad (12)$$

У свою чергу $\Phi = BS$, тоді

$$u = wS \frac{dB}{dt} \quad (13)$$

Струм у котушці знайдемо, використовуючи закон повного струму

$$i = \frac{Hl}{w}. \quad (14)$$

Тоді втрати потужності на гістерезис

$$P_r = \frac{1}{T} \int_0^T wS \frac{dB}{dt} \cdot \frac{Hl}{w} dt = \frac{Sl}{T} \oint HdB = fV \oint HdB, \quad (15)$$

де V – об'єм осердя магнітопроводу, m^3 ;

f – частота струму, $Гц$.

Якщо розглянути петлю гістерезиса (рис.6), то її площа дорівнює $\oint HdB$. Таким чином, втрати активної потужності на гістерезис прямо пропорційні частоті струму, об'єму осердя та площі петлі гістерезиса. Для

зменшення втрат активної потужності на гістерезис треба магнітопроводи виготовлять з феромагнітного матеріалу, що має вузьку петлю гістерезису.

Вперше, вивчаючи феромагнітні матеріали і ряд закономірностей їх намагнічування, відкрив петлю гістерезиса О.Г. Столетов у 1872 році.

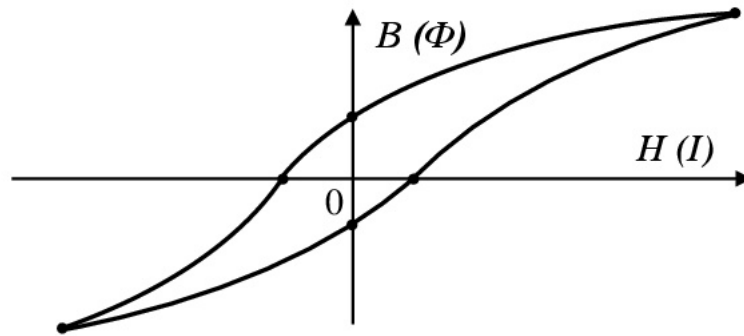


Рисунок 6 – Петля гістерезису феромагнітних матеріалів

В іншому вигляді можемо записати

$$P_r = r_{mr} I_a^2, \quad (16)$$

де r_{mr} – еквівалентний активний опір магнітопроводу, за допомогою якого враховуються втрати активної потужності на гістерезис, Ом;

P_r – втрати активної потужності на гістерезис, Вт.

Змінний струм, який проходить по котушці, створює в магнітопроводі змінний магнітний потік. Останній наводить у осерді електрорушійну силу (ЕРС), під дією якої виникають **вихрові струми**, які замикаються по симетричних контурах (рисунок 7). Ці вихрові струми нагрівають сталеве осердя, тобто в осерді мають місце втрати активної потужності. Крім цього, вихрові струми, які мають напрям,

протилежний напрямку струму в проводі котушці, розмагнічують внутрішню частину осердя.

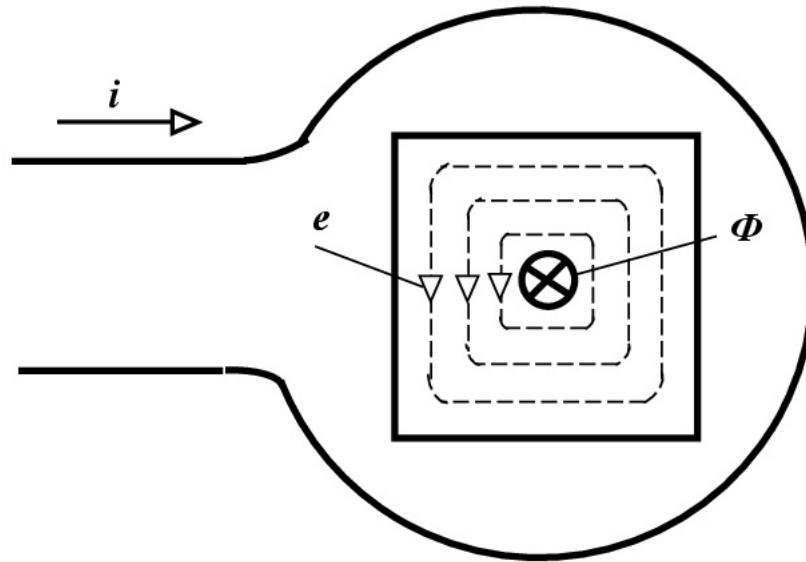


Рисунок 7 – Напрями ЕРС і магнітного потоку в залежності від напрямку струму в котушці

Для зменшення цих негативних явищ осердя складається з окремих ізолюваних одна від іншої пластин (рисунок 8). При цьому опір проходженню вихрових струмів різко зростає, тому ці струми стають незначними. У цілому втрати активної потужності на вихрові струми прямо пропорційні квадрату частоти струму, товщині окремих листів електротехнічної сталі та магнітній індукції.

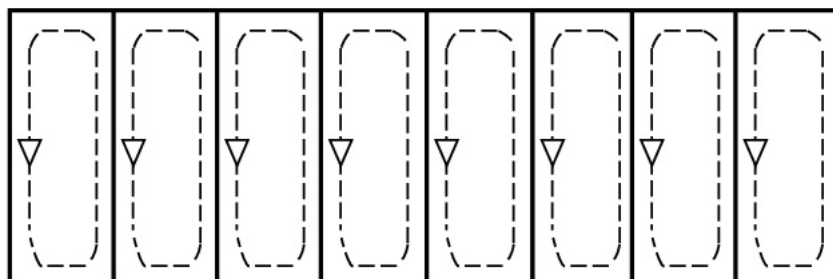


Рисунок 8 – Напрямок ЕРС у осерді при складанні його з окремих ізолюваних одна від іншої пластин

Можемо записати в іншому вигляді

$$P_e = r_{me} \cdot I_a^2, \quad (17)$$

де r_{me} – еквівалентний активний опір, за допомогою якого враховуються втрати активної потужності в магнітопроводі на вихрові струми, *Ом*;

P_e – втрати активної потужності в магнітопроводі на вихрові струми, *Вт*.

В цілому втрати активної потужності в електротехнічній сталі (далі в сталі) можна визначити

$$P_c = P_r + P_e = (r_{mr} + r_{me}) \cdot I_a^2 = r_m \cdot I_a^2, \quad (18)$$

де r_m – еквівалентний активний опір, який враховує втрати активної потужності в магнітопроводі з сталі, *Ом*.

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Опрацювати теоретичний матеріал за темою 15 «Нелінійні кола змінного струму [1: с.183-184], [2: с.260-266], [3: с.106-116].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 15.2,15.3[4].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.

- 2 Зібрати схему експериментальної установки при підключенні котушки до джерела постійного струму.
- 3 Виконати експериментальне дослідження при підключенні котушки до джерела постійного струму і результати занести в таблицю 1.
- 4 Зібрати схему експериментальної установки при підключенні котушки до джерела змінного струму.
- 5 Виконати експериментальне дослідження при підключенні котушки до джерела змінного струму і занести в таблицю 2.
- 6 Виконати необхідні розрахунки по визначенню параметрів еквівалентної розрахункової схеми котушки з феромагнітним осердям з урахуванням петлі гістерезису і занести в таблицю 3.
- 7 Оформити звіт та захистити його.

**Уміння, які здобуваються студентами в результаті
виконання експериментального дослідження**

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Уміти за допомогою експериментальних даних розрахувати активний опір проводу котушки з феромагнітним осердям.
- 4 Уміти за допомогою експериментальних даних розрахувати активний опір магнітопроводу котушки з феромагнітним осердям.
- 5 Уміти за допомогою експериментальних даних розрахувати втрати активної потужності у магнітопроводу котушки з феромагнітним осердям.

Опис експериментальної установки

1. Експериментальна установка складається з генератора постійного струму G , регулятора напруги R_H , амперметра PA , вольтметра PV ,

ватметру PW і котушки K з феромагнітним осердям. Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 9.

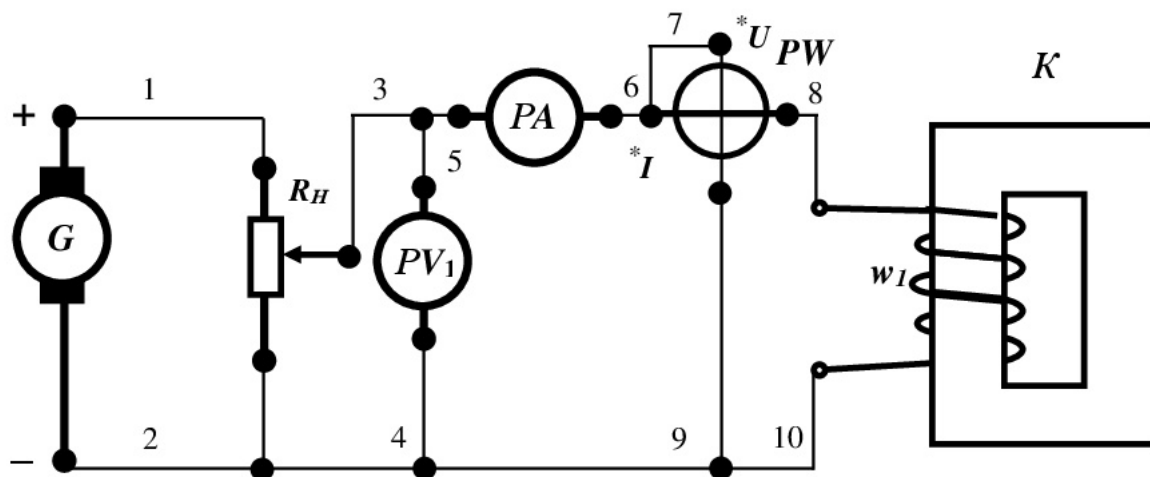


Рисунок 9 – Принципова схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 10 провідників (на схемі позначені номерами 1-10).

2. Експериментальна установка складається з генератора змінного струму G , лабораторного автотрансформатора TV , амперметра PA , вольтметра PV , ватметру PW , котушки K з феромагнітним осердям.

Для складання схеми необхідно мати 10 провідників (на схемі позначені номерами 1-10).

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 10.

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів дорівнюють нулю;
- опір обмотки амперметра і обмотки струму ватметра дорівнює нулю;

- опір обмотки вольтметра і обмотки напруги ватметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у них не протікає.

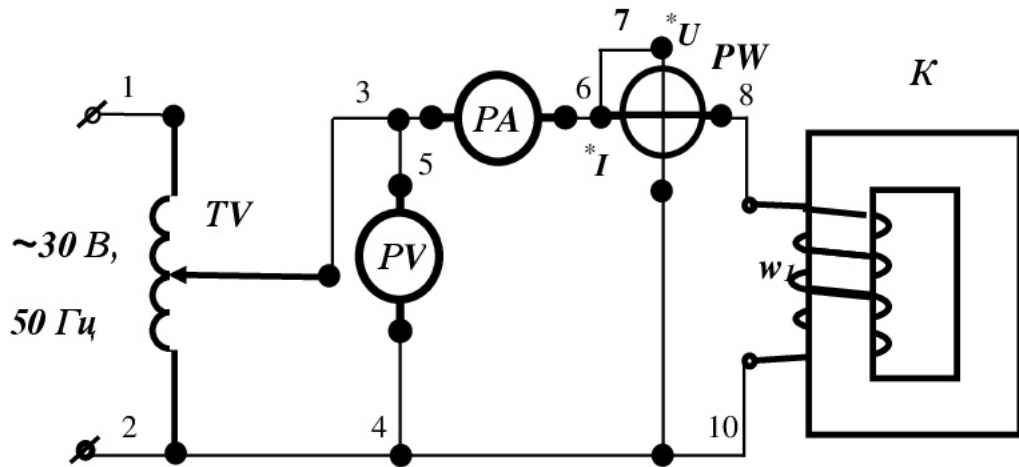


Рисунок 10 - Принципова схема експериментальної установки

1. Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела постійного струму, наведена на рисунку 11.

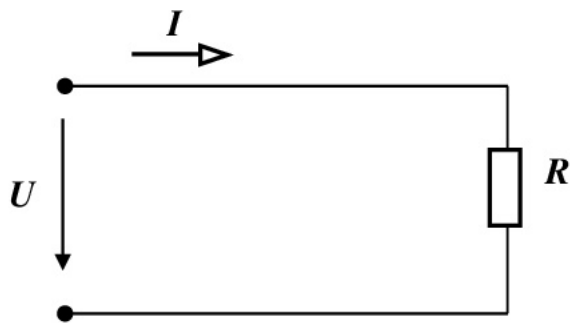


Рисунок 11 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела постійного струму

На розрахунковій схемі (рисунок 11) введені наступні умовні позначення:

U – напруга на затискачах котушки з феромагнітним осердям, В;

I – сила струму в електричному колі, A ;

R – опір проводу котушки, Ω ;

2. Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела змінного струму, наведена на рисунку 12.

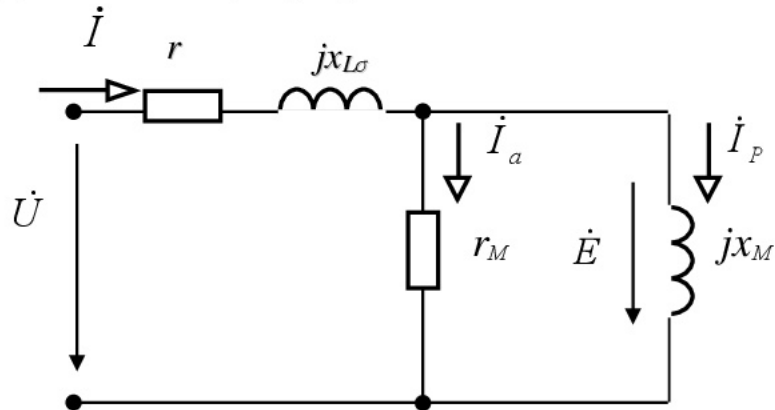


Рисунок 12 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела змінного струму

На розрахунковій схемі (рисунок 12) введені наступні умовні позначення:

\dot{U} – комплекс напруги на затискачах котушки з феромагнітним осердям, V ;

\dot{I} – комплекс сили струму в електричному колі, A ;

\dot{I}_a – комплекс активної складової струму, A ;

\dot{I}_P – комплекс реактивної складової струму, A ;

r – активний опір проводу котушки, Ω ;

$jx_{L\sigma}$ – реактивний опір котушки магнітному потоку розсіювання, Ω ;

r_m – активний опір магнітопроводу котушки, Ом;

jx_m – реактивний опір магнітопроводу котушки, Ом.

Порядок виконання роботи

1 Зібрати схему експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела постійного струму, наведена на рисунку 9.

2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

3 Встановити напругу за допомогою регулятора, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1 А, зняти показання приладів у колі котушки з феромагнітним осердям, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	I, A	U, B	P, Bm
Підключення котушки до джерела постійного струму			

4 Визначити за допомогою експериментальних даних таблиці 1 активний опір проводу котушки з феромагнітним осердям:

$$r = R = \frac{U}{I}. \quad (19)$$

5 Зібрати схему експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела постійного струму, наведена на рисунку 10.

6 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

7 Встановити напругу за допомогою регулятора (ЛАТР), при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1А, зняти показання приладів у колі котушки з феромагнітним осердям, результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	<i>I, A</i>	<i>U, B</i>	<i>P, Вт</i>
Підключення котушки до джерела змінного струму			

8 Визначити за допомогою експериментальних даних таблиці 2 активну потужність, що споживається проводом котушки з феромагнітним осердям на нагрів:

$$P_{np} = r \cdot I^2 . \quad (20)$$

9 Визначити за допомогою експериментальних даних таблиці 2 активну потужність, що споживається магнітопроводом котушки з феромагнітним осердям на нагрів від гістерезису і вихрових струмів, використовуючи рівняння:

$$P_M = P - P_{np}. \quad (21)$$

10 Занести отримані значення в таблицю 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку електричного кола

Фізичні величини, що характеризують коло			
$r, \text{ Ом}$	$P, \text{ Вт}$	$P_{np}, \text{ Вт}$	$P_M, \text{ Вт}$

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Мета лабораторної роботи.
- 3 Принципові електричні схеми експериментальної установки.
- 4 Розрахункові схеми електричного кола експериментальної установки.
- 5 Таблиця 5.1.
- 6 Таблиця 5.2.
- 7 Таблиця 5.3.
- 8 Висновки що причин і наслідків гістерезису і вихрових струмів.

Контрольні запитання

- 1 Що таке ідеальна котушка з феромагнітним осердям у колі змінного синусоїдного струму?
- 2 Складіть конструктивну схему ідеальної котушки з феромагнітним осердям (зневажаючи магнітним потоком розсіювання, втратами на гістерезис і вихрові струми, приймаючи активний опір проводу котушки рівним нулю) при живленні від джерела змінного струму.

- 3 Запишіть математично і розшифруйте закон електромагнетизму для ідеальної котушки з феромагнітним осердям.
- 4 Який вид має вираз миттєвої напруги джерела при початковій фазі рівній 90° і одержіть вираз миттєвого магнітного потоку?
- 5 Який вид має вираз миттєвого несинусоїдного струму для ідеальної котушки з феромагнітним осердям, замінивши його еквівалентним синусоїдним при початковій фазі магнітного потоку рівній нулю?
- 6 Який вид має миттєвої ЕРС самоіндукції при початковій фазі магнітного потоку рівній нулю ?
- 7 Побудуйте векторну діаграму ідеальної котушки з феромагнітним осердям.
- 8 Складіть розрахункову схему ідеальної котушки з феромагнітним осердям
- 9 Який вигляд буде мати крива струму з урахуванням втрат на гістерезис і вихрові струми?
- 10 Запишіть вирази миттєвих напруги при початковій фазі рівній 90° , струму, магнітного потоку і ЕРС самоіндукції з урахуванням втрат на гістерезис і вихрові струми.
- 11 Побудуйте векторну діаграму котушки з феромагнітним осердям з урахуванням втрат на гістерезис і вихрові струми.
- 12 Складіть розрахункову схему котушки з феромагнітним осердям з урахуванням втрат на гістерезис і вихрові струми.
- 13 Від чого і як залежать втрати активної потужності на гістерезис?
- 14 З яких складових складається намагнічуючий струм, що вони характеризують?
- 15 Від чого і як залежать втрати активної потужності на вихрові струми?
- 16 Які фізичні явища і процеси спостерігаються в котушці з феромагнітним осердям при включенні до джерела постійного струму?

- 17 Які фізичні явища і процеси спостерігаються в котушці з феромагнітним осердям при включенні до джерела змінного струму?
- 18 Які фізичні явища і процеси спостерігаються в магнітопроводі котушки з феромагнітним осердям при включенні до джерела змінного струму?
- 19 Чи спостерігається явище гістерезису в котушці з феромагнітним осердям при включенні до джерела постійного струму? Відповідь обґрунтуйте.
- 20 Чи спостерігається явище вихрових струмів в котушці з феромагнітним осердям при включенні до джерела постійного струму? Відповідь обґрунтуйте.
- 21 Як зменшити втрати активної потужності в котушці з феромагнітним осердям на гістерезис?
- 22 Як зменшити втрати активної потужності в котушці з феромагнітним осердям на вихрові струми?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. Ч. 2, 3. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1979. – 432 с.
- 4 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання

з теми 15 «Нелінійні кола змінного струму». / І.О. Попова. – Мелітополь:
ТДАТУ, 2016 – 55 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТИВНОЇ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при визначенні параметрів індуктивної котушки з феромагнітним осердям за експериментальними даними, вивчення фізичних процесів, що виникають в індуктивній котушці з феромагнітним осердям

Основні теоретичні відомості

Розглянемо фізичні процеси, які виникають у котушці з феромагнітним осердям у колі змінного струму (рис. 1).

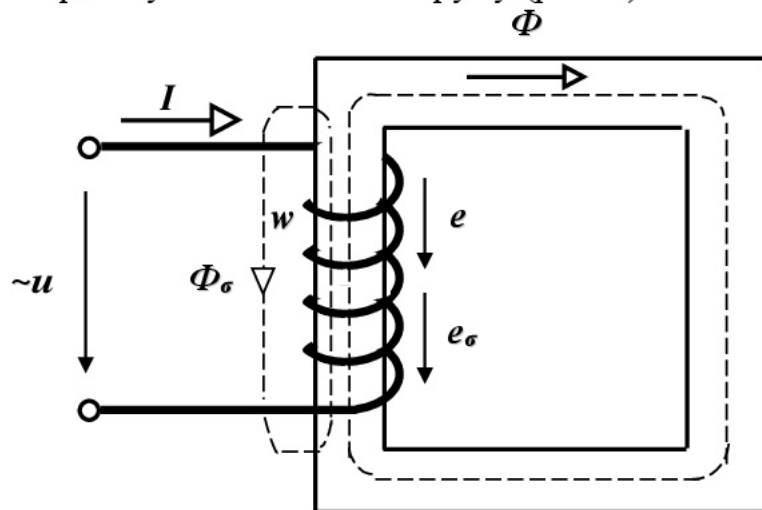


Рисунок 1 – Фізичні процеси, що виникають у котушці з феромагнітним осердям у колі змінного струму

Під дією синусоїдної напруги в колі котушки з феромагнітним осердям буде проходити змінний струм (виникне явище

електромагнетизму), який створить основний Φ і допоміжний розсіювання Φ_σ синусоїдні магнітні потоки, які будуть замикатися відповідно по осердю і повітря. Під дією цих магнітних потоків у котушці будуть спостерігатися явище електромагнітної індукції і наводитися відповідно ЕРС e і e_σ . Струм, який проходить по котушці, супроводжується виділенням теплоти в обмотці котушки. Основний магнітний потік Φ спричинює в магнітопроводі втрати активної потужності на гістерезис і вихрові струми і його нагрів.

Запишемо рівняння рівноваги напруги котушки з феромагнітним осердям

$$u = ri + L_\sigma \frac{di}{dt} - e, \quad (1)$$

де r – активний опір котушки, Ом;

L_σ – індуктивність котушки, обумовлена магнітним потоком розсіювання Φ_σ , Гн.

Відповідно до рівняння (1) замінимо реальну котушку з феромагнітним осердям еквівалентною їй (рисунок 2). Вона буде складатися з ідеальної котушки і послідовно з'єднаних з нею: активним опором проводу котушки r і реактивним опором магнітному потоку розсіювання x_σ .

Запишемо рівняння котушки з феромагнітним осердям в комплексній формі

$$\dot{U} = r\dot{I} + jx_\sigma\dot{I} - \dot{E}. \quad (2)$$

Побудуємо векторну діаграму реальної котушки з феромагнітним осердям (рисунок 3) та її розрахункову схему (рисунок 4).

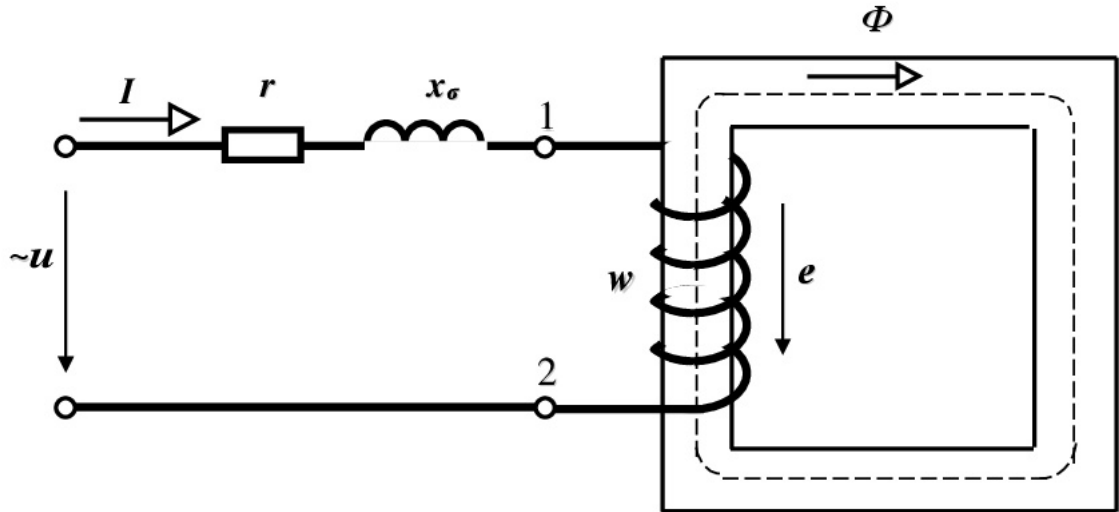


Рисунок 2 – Еквівалентна схема реальної котушки з феромагнітним осердям

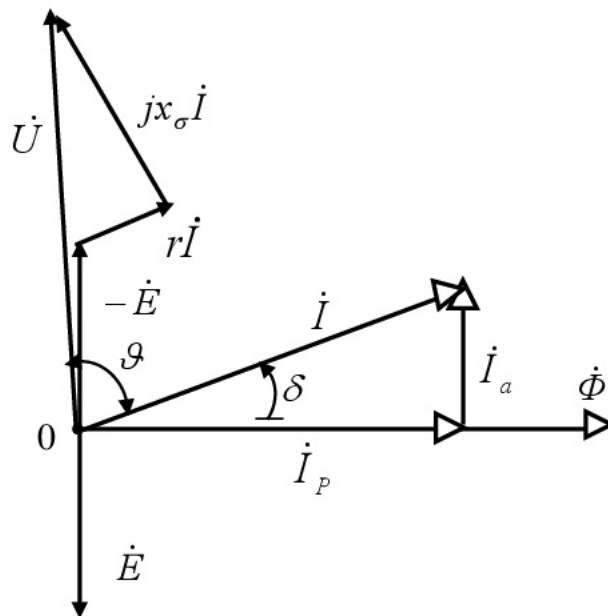


Рисунок 3 – Векторна діаграма напруги, сили струму, магнітного потоку і ЕРС самоіндукції реальної котушки з феромагнітним осердям

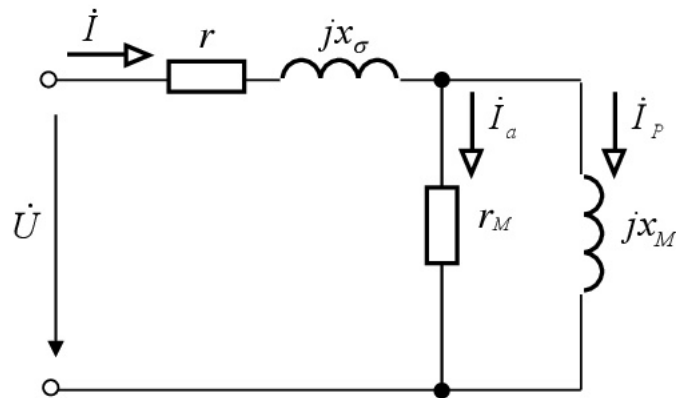


Рисунок 4 – Розрахункова схема індуктивної котушки з феромагнітним осердям

Знайдемо діюче значення ЕРС самоіндукції, якщо миттєвий магнітний потік

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t ; \quad (3)$$

Тоді вираз миттєвої ЕРС

$$\begin{aligned} e &= -w \frac{d\Phi}{dt} = -w\omega\Phi_m \sin(\omega t + 90^\circ) = w\omega\Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \\ &= E_m \sin(\omega t - 90^\circ), \end{aligned} \quad (4)$$

де максимальна ЕРС

$$E_m = w\omega\Phi_m \quad (5)$$

Тоді діюче значення ЕРС

$$E = \frac{w\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f w}{\sqrt{2}} \Phi_m = 4,44 f w \Phi_m. \quad (6)$$

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 15 «Нелінійні кола змінного струму» [1: с.183-186], [2: с.260-266], [3: с.106-116].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 15.4 [4].
- 3 Виконати тестові контрольні завдання для самоаналізу додатку Г.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.
- 2 Зібрати схему експериментальної установки.
- 3 Виконати експериментальне дослідження за допомогою експериментальної установки і результати занести в таблицю 1.
- 4 Занести параметри індуктивної котушки з феромагнітним осердям в таблицю 2.
- 4 Виконати необхідні розрахунки по визначенню параметрів еквівалентної розрахункової схеми індуктивної котушки з феромагнітним осердям і результати розрахунків занести в таблицю 3.
- 5 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті

виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола для простійного і змінного струму та пояснити основні явища і процеси, що виникають в цих колах.
- 3 Уміти за допомогою експериментальних даних розрахувати параметри розрахункової схеми котушки з феромагнітним осердям.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з генератора змінного струму G , лабораторного автотрансформатора TV , амперметра PA , вольтметрів PV_1 , PV_2 , ватметра PW , котушки з феромагнітним осердям і вимірювальна котушка K .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 5.

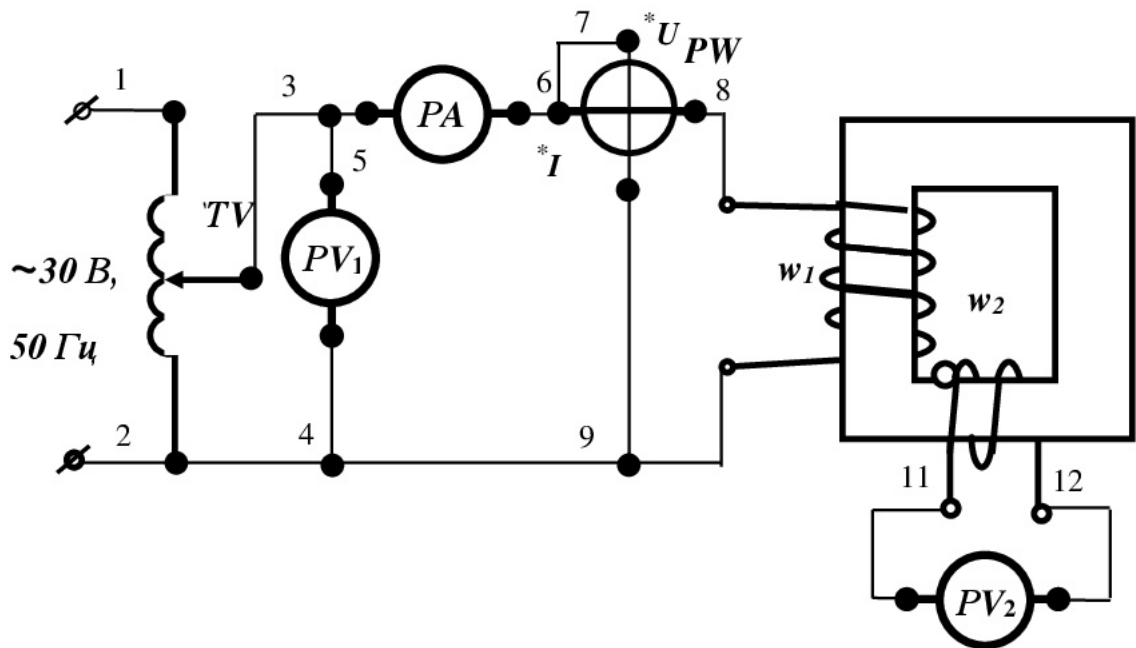


Рисунок 5 – Принципова схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 12 провідників (на схемі позначені номерами 1-12).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів дорівнюють нулю;
- опір обмотки амперметра і обмотки струму ватметра дорівнює нулю;

- опір обмоток вольтметрів і обмотки напруги ватметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у них не протікає.

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела змінного струму, наведена на рисунку 6.

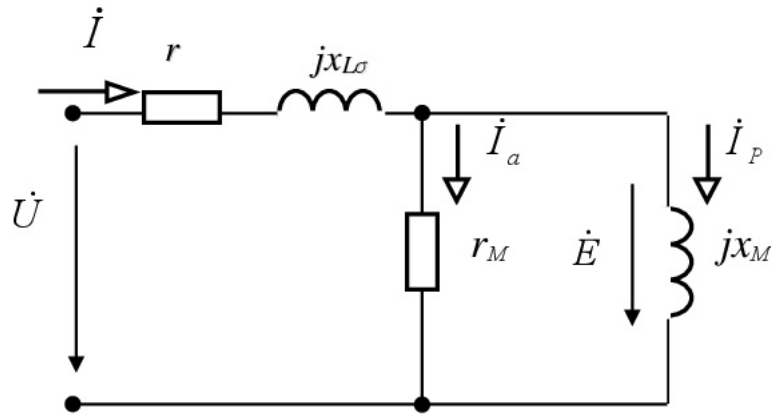


Рисунок 6 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела змінного струму

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

\dot{U} – напруга на затискачах котушки з феромагнітним осердям, B ;

\dot{I} – сила струму в електричному колі, A ;

\dot{I}_a – активна складова струму, A ;

\dot{I}_P – реактивна складова струму, A ;

r – активний опір проводу котушки, Ω ;

$jx_{L\sigma}$ – реактивний опір котушки магнітному потоку розсіювання, Ω ;

r_M – активний опір магнітопроводу котушки, Ω ;

jx_M – реактивний опір магнітопроводу котушки, Ω .

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки при підключенні котушки з феромагнітним осердям до джерела змінного струму, наведена на рисунку 5.
- 2 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.
- 3 Встановити напругу за допомогою регулятора, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує **1,5 А**, зняти показання приладів у колі котушки з феромагнітним осердям, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень котушки

Умови проведення експерименту	Показання приладів			
	I, A	U_1, B	U_2, B	P, Bm
Підключення котушки до джерела змінного струму				

- 4 Записати у таблицю 2 параметри досліджуваної індуктивної котушки з феромагнітним осереддям.

Таблиця 2 – Параметри індуктивної котушки

$r, Ом$	w_1	w_2

- 5 Визначити за допомогою експериментальних даних активну потужність, що споживається проводом котушки на нагрів

$$P_{\text{ПР}} = r \cdot I^2 ; \quad (7)$$

де r – опір проводу котушки, Ом.

6 Визначити за допомогою експериментальних активну потужність, що споживається котушкою з феромагнітним осердям.

7 Визначити за допомогою експериментальних і розрахункових даних активну потужність, що споживається магнітопроводом котушки з феромагнітним осердям на гістерезис і вихрові струми, використовуючи рівняння

$$P = P_{\text{ПР}} + P_{\text{м}}. \quad (8)$$

8 Визначити за допомогою експериментальних даних ЕРС взаємоіндукції у вимірювальній котушці w_2 , використовуючи рівняння

$$U_2 = E_2. \quad (9)$$

9 Визначити амплітуду магнітного потоку у магнітопроводі котушки, використовуючи рівняння

$$E_2 = 4,44 f \cdot w_2 \cdot \Phi_m. \quad (10)$$

10 Визначити ЕРС самоіндукції у котушці з феромагнітним осереддям, використовуючи рівняння

$$E_1 = 4,44 f \cdot w_1 \cdot \Phi_m. \quad (11)$$

11 Визначити активну складову струму в котушці з феромагнітним осердям, використовуючи рівняння

$$I_a = \frac{P_m}{E_l} . \quad (12)$$

12 Визначити активний опір магнітопроводу котушки з феромагнітним осердям, використовуючи рівняння

$$r_m = \frac{P_m}{I_a^2} . \quad (13)$$

13 Визначити реактивну складову струму в котушці з феромагнітним осердям, використовуючи рівняння

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} . \quad (14)$$

14 Визначити реактивний опір магнітопроводу котушки з феромагнітним осердям, використовуючи рівняння

$$E_l = x_m \cdot I_p . \quad (15)$$

15 Визначити реактивний опір потоку розсіювання котушки з феромагнітним осердям, використовуючи рівняння:

$$\dot{U}_l = r \cdot \dot{I} + jx_\sigma \cdot \dot{I} - \dot{E}_l . \quad (16)$$

16 Занести отримані значення в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати розрахунку електричного кола

Фізичні величини, що характеризують коло										
$r,$ <i>Ом</i>	$P,$ <i>Вт</i>	$P_{\text{ПР}},$ <i>Вт</i>	$P_M,$ <i>Вт</i>	$\Phi_m,$ <i>Вб</i>	$E_I,$ <i>В</i>	$I_a,$ <i>А</i>	$I_p,$ <i>А</i>	$r_M,$ <i>Ом</i>	$x_M,$ <i>Ом</i>	$x_\sigma,$ <i>Ом</i>

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Мета лабораторної роботи.
- 3 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 4 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.
- 5 Таблиця 1.
- 6 Таблиця 2.
- 7 Таблиця 3.
- 8 Висновок щодо матеріалу і призначення магнітопроводу у котушці.

Контрольні запитання

- 1 Які фізичні явища і процеси спостерігаються в реальній індуктивній котушці з феромагнітним осердям у колі змінного струму?
- 2 Складіть конструктивну схему реальної індуктивної котушки, вказавши фізичні величини.
- 3 Як записується рівняння рівноваги напруги реальної індуктивної котушки з феромагнітним осердям для миттєвих значень?

- 4 Складіть розрахункову схему реальної індуктивної котушки з феромагнітним осердям.
- 5 Як записується рівняння рівноваги напруги реальної індуктивної котушки з феромагнітним осердям для миттєвих значень?
- 6 Як записується рівняння рівноваги напруги реальної котушки з феромагнітним осердям в комплексній формі?
- 7 Як визначити максимальний магнітний потік в магнітопроводі котушки з феромагнітним осердям за експериментальними даними?
- 8 Який вираз основного магнітного потоку, прийнявши початкову фазу рівною нулю?
- 9 Який вираз ЕРС самоіндукції реальної котушки з феромагнітним осердям, задавшись миттєвим значенням магнітного потоку при початковій фазі рівній нулю?
- 10 Як розрахувати діюче значення ЕРС самоіндукції котушки з феромагнітним осердям?
- 11 Як визначити ЕРС взаємоіндукції у вимірювальній котушці за експериментальними даними?
- 12 Як визначити активну складову струму в котушці з феромагнітним осердям?
- 13 Як визначити реактивну складову струму в котушці з феромагнітним осердям?
- 14 Як визначити силу струму в котушці з феромагнітним осердям за допомогою активної і реактивної складових струму?
- 15 Як визначити активний опір магнітопроводу котушки з феромагнітним осердям?
- 16 Як визначити активну потужність, яка виділяється в проводі котушки на нагрів?
- 17 Яка причина виникнення явища гістерезиса в осерді котушки?

- 18 Від чого залежить втрата потужності на гістерезис?
- 19 Який існує спосіб зменшення втрат потужності у котушці з феромагнітному осередді котушки від гістерезису?
- 20 Яке явище є причиною виникнення вихрових струмів в осерді котушки?
- 21 Від чого залежить втрата потужності на вихрові струми?
- 22 Які існують способи зменшення втрат потужності у феромагнітному осередді котушки від вихрових струмів?
- 23 Як визначити активну потужність, яка виділяється в магнітопроводі котушки?
- 24 Які втрати потужності мають місце в котушці з феромагнітним осереддям і як вони відображаються на розрахунковій схемі?
- 25 Яким явищем зумовлений індуктивний опір феромагнітного магнітопроводу котушки?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1970. – 592 с.
- 3 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання з теми 15 «Нелінійні кола змінного струму» /І.О. Попова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016. – 55 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ. ФЕРОРЕЗОНАНС НАПРУГИ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при дослідженні режиму ферорезонансу напруги в електричних колах, що містять послідовно з'єднані конденсатор і індуктивну котушку з феромагнітним осердям

Основні теоретичні відомості

Резонанс напруги у колі, що містить котушку з насиченим феромагнітним магнітопроводом, з'єднану послідовно з конденсатором називається ферорезонансом напруги.

У колах з нелінійною індуктивністю, що містять ємність, плавна зміна напруги може викликати скачки фази й амплітуди основної гармоніки струму, і, навпаки, плавна зміна струму може супроводжуватися стрибкоподібною зміною фази й амплітуди основної гармоніки напруги на деяких ділянках кола.

Під **ферорезонансом напруги** розуміють стрибкоподібну зміну знака кута зсуву фаз між основними гармоніками напруги й струму, а також різку зміну величини силу струму при незначній зміні напруги на вході кола.

Ці явища пов'язані з нелінійністю котушки зі сталлю.

У лінійних колах подібні явища принципово неможливі.

Розглянемо розрахункову схему послідовно з'єднаних ідеальних конденсатора й котушки з феромагнітним осереддям (рисунок 1).

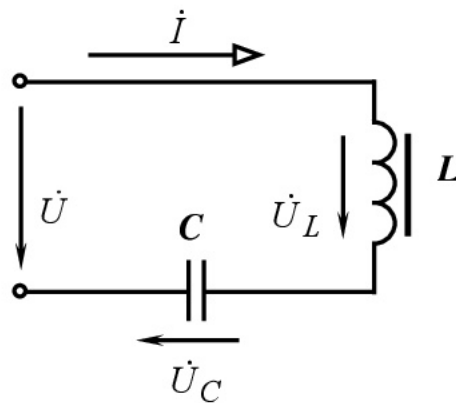


Рисунок 1 – Розрахункова схема послідовно з'єднаних ідеального конденсатора й котушки з феромагнітним осереддям

Котушка з феромагнітним осереддям є нелінійним елементом, то при синусоїдній напрузі і синусоїдному магнітному потоці струм має несинусоїдну форму (рисунок 2).

Аналіз ферорезонансу з урахуванням несинусоїдності форми кривої струму представляє значні труднощі, тому застосуємо метод еквівалентних синусоїд (еквівалентний струм i_e).

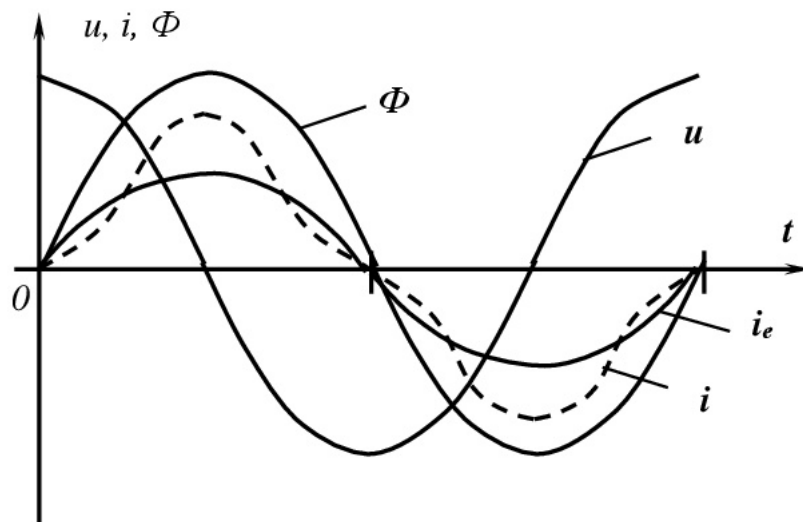


Рисунок 2 – Графічні залежності миттєвої напруги, магнітного потоку, струму і еквівалентного струму у котушці з феромагнітним сердцем

Крім того, для спрощення міркувань приймемо, що котушка з феромагнітним магнітопроводом, яка включена в електричне коло, не має петлі гістерезису, вихрових струмів ($r_m = 0$), активний опір проводу обмотки дорівнює нулю ($r = 0$) тобто вона ідеальна і конденсатор ідеальний. Тоді векторна діаграма електричного кола з урахуванням спрощень має вигляд (рисунок 3).

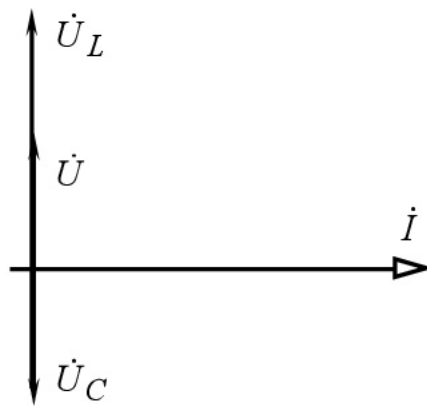


Рисунок 3 – Векторна діаграма напруг і струму з урахуванням спрощень при ферорезонансі напруг

Приймемо початкову фазу напруга на індуктивності \dot{U}_L рівною 90° , тобто напруга випереджає струм на 90° , напруга на ємності \dot{U}_C відстає від струму на 90° (рисунок 3).

Прикладена напруга на затискачах кола

$$\dot{U} = \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (1)$$

Оскільки вектори \dot{U}_L й \dot{U}_C спрямовані протилежно (рисунок 3), тоді величина прикладеної напруги до затискачів кола визначається як

$$U = |U_L - U_C| \quad (2)$$

ВАХ котушки $U_L(I)$ є кривою лінійною, ВАХ конденсатора $U_C(I)$ є похилою прямою, що проходять через початок координат (рисунок 4). Величину ємності завжди можна вибрати такою, щоб ВАХ конденсатора перетнула ВАХ котушки з феромагнітним осердям. Різниця між залежностями $U_L(I)$ і $U_C(I)$ утворюють криву $U(I)$, ординати якої визначають значення прикладеної напруги при різних значеннях струму (рисунок 4).

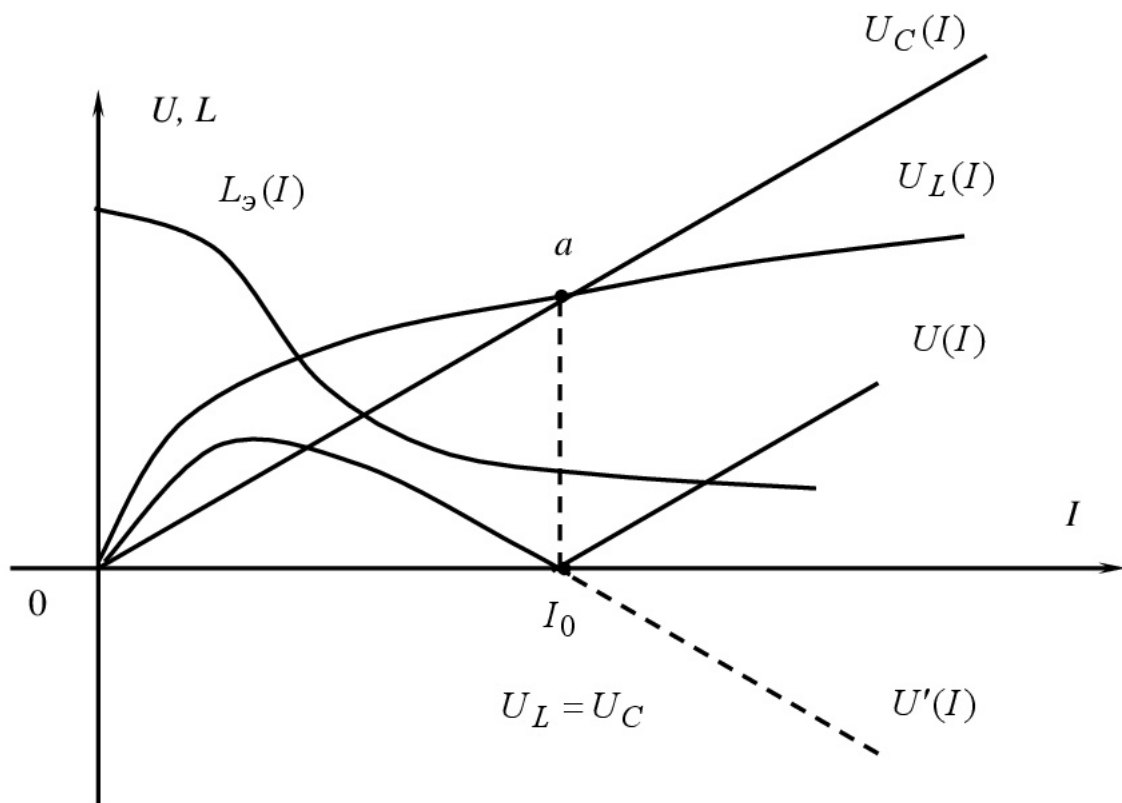


Рисунок 4 – ВАХ ідеальної котушки з феромагнітним осердям, ідеального конденсатора і електричного кола при послідовному з'єднанні котушки і конденсатора

Точка «а» перетину $U_L(I)$ і $U_C(I)$ відповідає ферорезонансу напруги ($U_L = U_C$).

Ферорезонанс напруг настає за рахунок зміни індуктивності, магнітної проникності феромагнітного матеріалу магнітопроводу котушки. Однак, на відміну від лінійних кіл, зміна індуктивності відбувається не залежно від струму кола, наслідок залежності Еквівалентну індуктивність котушки з феромагнітним магнітопроводом можна визначити

$$L_a = \frac{U_L}{\omega I} \quad (3)$$

Область характеристики $U(I)$ поблизу точки I_0 носить теоретичний характер.

Практично через втрати в сталі і в проводі котушки, а особливо через несинусоїдну форми кривої струму, графічна залежність ВАХ $U(I)$ електричного кола має такий вигляд (рисунок 5)

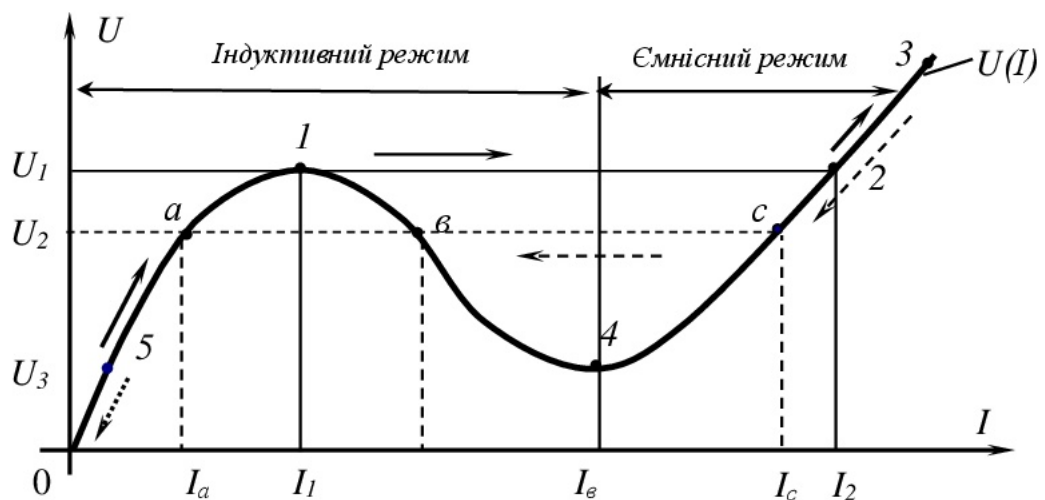


Рисунок 5 – ВАХ електричного кола з послідовно з'єднаними реальною котушкою зі сталлю і конденсатором

При зміні напруги U від нуля до U_1 струм по фазі відстає від напруги – індуктивний режим. Зміна режиму відбувається при досягненні точки 1. У точці 1 спостерігається стрибок струму, при якому струм зростає з I_1 до величини I_2 , що відповідає точці 2. По фазі струм I_2 вже випереджає напругу (перекидання фази) – ємнісний режим. Подальше зростання напруги викликає плавне збільшення струму (точка 3).

Зменшення напруги до величини U_3 (точка с) знову викликає зворотній стрибок струму з I_c до I_a , що відповідає переходу із точки 3 у точку 5. З характеристики (рисунок 5) видно, що при одній напрузі U_2 на затискачах електричного кола можливі три значення струму: I_a , I_b , I_c . У двох перших випадках струм відстає по фазі від напруги ($U_L > U_C$). А у третьому випадку – випереджає його ($U_L < U_C$). Така невизначеність – декілька значень струму в колі при одній і тій же напрузі – може мати місце лише в колах з нелінійними характеристиками. Режим роботи електричного кола при струмах I_a і I_1 стійкий, оскільки ділянці з підйомом характеристики при збільшенні напруги U струм зростає, а при зменшенні напруги зменшується. Режим при струмі I_2 – нестійкий, оскільки на спадаючій ділянці ВАХ із зменшенням U струм зростає і з підвищенням напруги спадає, таким чином, що найменша зміна напруги викликає перехід від даного режиму роботи електричного кола до першого або третього режиму.

Характерно, що при кожному стрибку фаза струму по відношенню до прикладеної напруги U змінюється на 180° . Явище різкої зміни струму при незначній зміні напруги на вході називається тригерним ефектом у послідовному ферорезонансному колі.

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Опрацювати теоретичний матеріал за темою 15 «Нелінійні кола змінного струму» [1: с.455-459], [2: с.124-129], [3: с.376-377].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 15.5 [4].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.
- 2 Зібрати схему експериментальної установки для дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям і ВАХ конденсатора.
- 3 Виконати експериментальне дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям і результати занести в таблицю 1.
- 4 Виконати експериментальне дослідження вольт-амперної характеристики конденсатора і результати занести в таблицю 2.
- 5 Зібрати схему експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги.
- 6 Виконати експериментальне дослідження електричного кола і результати занести в таблицю 3.
- 7 Виконати необхідні розрахунки і результати розрахунків занести в таблицю 3.
- 8 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола для дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям і ВАХ конденсатора та зібрати її.
- 2 Уміти скласти принципову електричну схему кола для дослідження ферорезонансу напруги.

- 3 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола для дослідження ферорезонансу напруги та пояснити її.
- 4 Уміти підібрати ємність конденсатора для виникнення в електричному колі ферорезонансу напруги.
- 5 Уміти за допомогою експериментальних даних розрахувати параметри розрахункової схеми електричного кола для дослідження ферорезонансу напруги.

Опис експериментальної установки

1. Експериментальна установка для дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям і ВАХ конденсатора складається з генератора змінного струму G , лабораторного автотрансформатора TV , амперметра PA , вольтметра PV , котушки з феромагнітним осердям і конденсатора.

Принципова електрична схема експериментальної установки для дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям і ВАХ конденсатора наведена на рисунку 6.

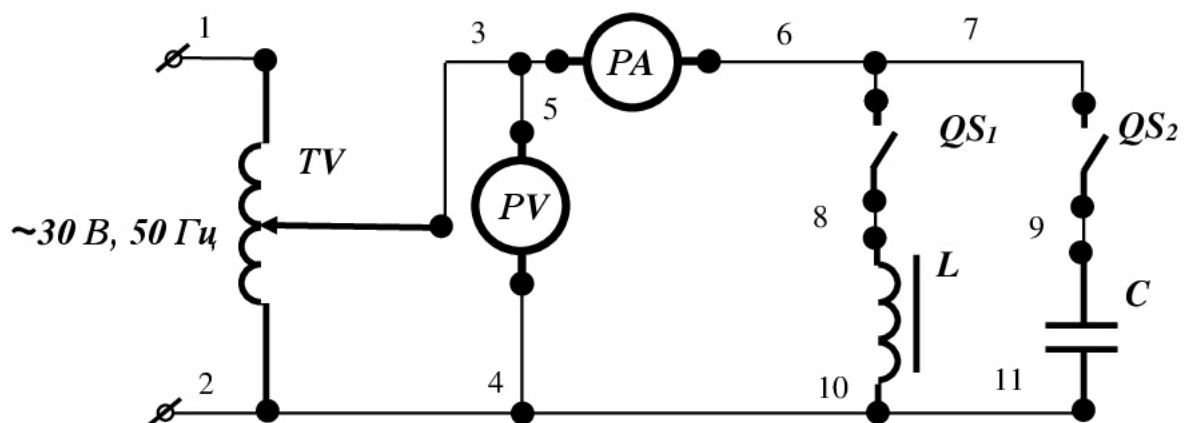


Рисунок 6 - Принципова схема експериментальної установки для дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям і конденсатора

Для складання схеми необхідно мати 11 провідників (на схемі позначені номерами 1-11).

2. Експериментальна установка для дослідження ферорезонансу складається з генератора змінного струму G , лабораторного автотрансформатора TV , реостат R_H для обмеження сили струму, амперметра PA , вольтметрів PV_1 , PV_2 , PV_3 , котушки з феромагнітним K осердям і конденсатора C і вимикачі QS_1 , QS_2 .

Принципова електрична схема експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги наведена на рисунку 7.

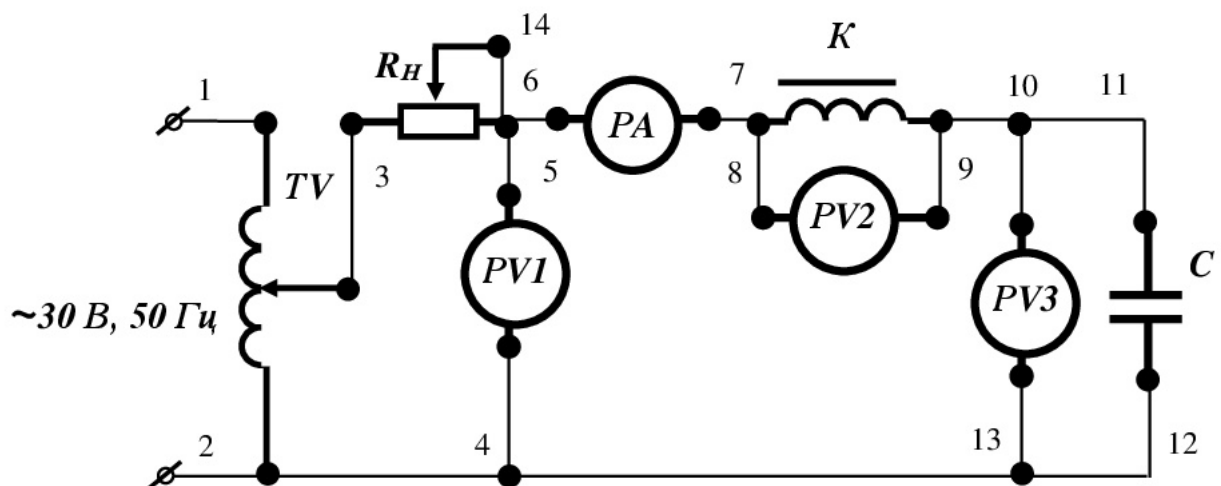


Рисунок 7 - Принципова електрична схема експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги

Для складання схеми необхідно мати 14 провідників (на схемі позначені номерами 1-14).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми електричного кола для дослідження ферорезонансу напруги прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів дорівнюють нулю;
- опір обмотки амперметра дорівнює нулю;
- опір обмоток вольтметрів дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у них не протікає;
- активний опір котушки з феромагнітним осердям дорівнює нулю;
- активний опір конденсатора дорівнює нескінченності, тобто конденсатор ідеальний.

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги наведена на рисунку 8.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

\dot{U} – напруга на затискачах котушки з феромагнітним осердям, В;

\dot{I} – сила струму в електричному колі, А;

L – нелінійна індуктивність котушки з феромагнітним осердям, Гн;

C – ємність конденсатора, Ф.

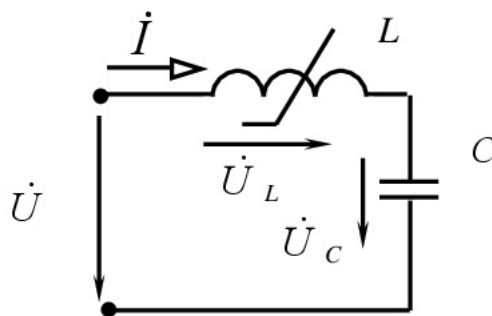


Рисунок 8 – Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги

Порядок виконання роботи

1 Зібрати схему експериментальної установки для дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям і ВАХ конденсатора, що наведена на рисунку 6.

2 Замкнути вимикач QS_1 , а вимикач QS_2 розімкнути.

3 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

4 Змінюючи напругу за допомогою регулятора напруги від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1A , зняти показання приладів у колі котушки з феромагнітним осердям, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень вольт-амперної характеристики котушки з феромагнітним осердям $U_L(I_L)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів									
Вимикач QS_2 замкнений, вимикач QS_1 розімкнений	$U_L, \text{В}$	0								
	$I_L, \text{А}$									

5 Встановити ємність конденсатора $50 \dots 70 \text{ мкФ}$. Замкнути вимикач QS_2 , а вимикач QS_1 розімкнути.

6 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

7 Змінюючи напругу за допомогою регулятора напруги від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує 1A , зняти показання приладів у колі конденсатора, результати занести в таблицю 2.

8 Побудувати графіки ВАХ котушки з феромагнітним осердям $U_L(I_L)$ і ВАХ конденсатора $U_C(I_C)$ в одних осях. Визначити: чи можливий режим

ферорезонансу напруги у колі при обраній ємності конденсатора, для цього знайдіть точку перетину графіків ВАХ котушки і конденсатора.

9 Побудувати в тій же площині графік ВАХ електричного кола $U(I)$ при послідовному з'єднанні котушки з феромагнітним осердям і конденсатора, використовуючи рівняння (2).

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень вольт-амперної характеристики конденсатора $U_C(I_C)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів									
Вимикач QS_2 замкнений, вимикач QS_1 розімкнений	$U_C, \text{В}$	0								
	$I_C, \text{А}$									

10 Визначити за допомогою графіка ВАХ електричного кола $U(I)$:

- напругу в колі $U_{СТР}$, при якій відбувається стрибок струму;
- силу струму на початку стрибка I_1 ;
- сила струму на при кінці стрибка I_2 ;
- визначити напругу на котушці з феромагнітним осердям при ферорезонансі напруги U_{LP} ;
- визначити напругу на конденсаторі при ферорезонансі напруги U_{CP} ;
- визначити силу струму при ферорезонансі напруги I_P ;
- визначити еквівалентну індуктивність котушки в момент ферорезонансу напруги, використовуючи рівняння

$$L_e = \frac{U_{LP}}{\omega I_p} \quad (4)$$

- визначити реактивний опір конденсатора в момент ферорезонансу напруги, використовуючи рівняння

$$x_C = \frac{U_{CP}}{I_p} \quad (5)$$

- визначити ємність конденсатора в момент ферорезонансу напруги, використовуючи рівняння

$$C = \frac{I}{\omega \cdot x_C} \quad (6)$$

11 Результати розрахунку електричного кола при ферорезонансі напруги занести в таблицю 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку електричного кола

Фізичні величини, що характеризують коло							
$U_{CTP},$ B	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$I_P,$ A	$U_{LP},,$ B	$L_e,$ $Гн$	$U_{CP},,$ B	$C,,$ Φ

12 Побудувати векторну діаграму напруг і струму для режиму ферорезонансу в масштабі.

13 Зібрати схему експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги, що наведена на рисунку 7.

14 Ввести реостат R_H для обмеження сили струму.

15 Подати напругу на затискачі експериментальної установки.

16 Змінюючи напругу за допомогою автотрансформатора від 0 до значення, при якому струм у електричному дослідному колі не перевищує **2А**, зняти експериментальну вольт-амперну характеристику $U_E(I_E)$ електричного кола, показання приладів у електричному колі занести в таблицю 4.

14 Побудувати в тій же площині графік експериментальних досліджень ВАХ електричного кола $U_E(I_E)$ при дослідженні ферорезонансу напруги.

Таблиця 4 – Результати експериментальних досліджень вольт-амперної характеристики кола $U_E(I_E)$

Умови проведення експерименту	Показання приладів									
Реостат R_H введений	U_E , В	0								
	I_E , А									

Зміст звіту

1 Назва лабораторної роботи.

2 Мета лабораторної роботи.

3 Принципові електричні схеми експериментальних установок.

4 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги.

5 Таблиця 1.

- 6 Таблиця 2.
- 7 Таблиця 3.
- 8 Таблиця 4.
- 9 Векторна діаграма.
- 10 Висновок щодо причин, умов виникнення і наслідків ферорезонансу напруг.

Контрольні запитання

- 1 Що розуміється під резонансом напруг?
- 2 При яких умовах виникає резонанс напруг?
- 3 Що розуміється під ферорезонансом напруг?
- 4 Що загального і у чому різниця між резонансом напруг у лінійних колах і ферорезонансом?
- 5 Чому у нелінійних колах з послідовно з'єднаними котушкою з феромагнітним осердям і конденсатором при зміні напруги виникає ферорезонанс напруг?
- 6 Як змінюється індуктивність котушки з феромагнітним магнітопроводом при збільшенні напруги на її затискачах?
- 7 Чому дорівнює кут зсуву фаз при ферорезонансі напруг?
- 8 Що розуміється під явищем «перекидання фази»?
- 9 Що розуміється під «тригерним ефектом» у ферорезонансному колі?
- 10 Які фізичні процеси спостерігаються у електричному колі при ферорезонансі напруги?
- 11 Який вигляд має векторна діаграма струму і напруг при ферорезонансі напруг?
- 12 Як визначити еквівалентний індуктивний опір котушки з феромагнітним магнітопроводом при ферорезонансі напруг в електричному колі?

- 13 Як визначити еквівалентну індуктивність котушки при резонансі напруг в електричному колі?
- 14 Як визначити реактивний ємнісний опір конденсатора при ферорезонансі напруг в електричному колі?
- 15 Як визначити ємність конденсатора при резонансі напруг в електричному колі?
- 16 Як визначити напругу на індуктивності котушки в електричному колі?
- 17 Як визначити напругу на ємності конденсатора в електричному колі?
- 18 Який вигляд має векторна діаграма струму і напруг при ферорезонансі напруг?
- 19 Який вигляд має векторна діаграма струму і напруг до ферорезонансу напруг?
- 20 Який вигляд має векторна діаграма струму і напруг після ферорезонансу напруг?
- 21 Як визначити енергію, що накопичується у магнітному полі котушки з феромагнітним магнітопроводом в момент ферорезонансу?
- 22 Як визначити енергію, що накопичується у електричному полі конденсатора в момент ферорезонансу?

Список літератури

1. Зевеке Г.В. Основы теории цепей. / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
2. Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1970. – 592 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Ч.1. / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. Шк., 1978. – 517 с.

4 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання з теми 15 «Нелінійні кола змінного струму». / І.О. Попова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016. – 55 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок визначення параметрів трансформатора з феромагнітним осердям, вивчення фізичних явищ і процесів у трансформаторі з феромагнітним осердям

Основні теоретичні відомості

Електромагнітні явища в трансформаторі з феромагнітним (сталевим) осердям подібні явищам у повітряному трансформаторі: явище електричного струму, електромагнетизм (основний і потік розсіювання у первинній обмотці), електромагнітної індукції (ЕРС самоіндукції і ЕРС розсіювання у первинній обмотці ЕРС взаємоіндукції у вторинній обмотці) і теплової дії струму у первинній обмотці. Якщо до вторинної обмотки підключити навантаження, то у вторинній обмотці: виникне явище електричного струму, явище електромагнетизму (потік розсіювання) і процес нагріву вторинної обмотки. В феромагнітному магнітопроводі але буде спостерігатися явища гістерезису і вихрових струмів.

На відміну від повітряного трансформатора магнітний потік, який пронизує обидві обмотки, замикається не по повітрю, а через сталеве осердя. Конструктивну схему трансформатора зі сталевим осердям наведено на рисунку 1.

При навантаженні трансформатора існують три магнітних потоки: Φ – основний у осерді, $\Phi_{\sigma 1}$ – розсіювання, зв'язаний тільки з первинною обмоткою, $\Phi_{\sigma 2}$ – розсіювання, зв'язаний тільки з вторинною обмоткою.

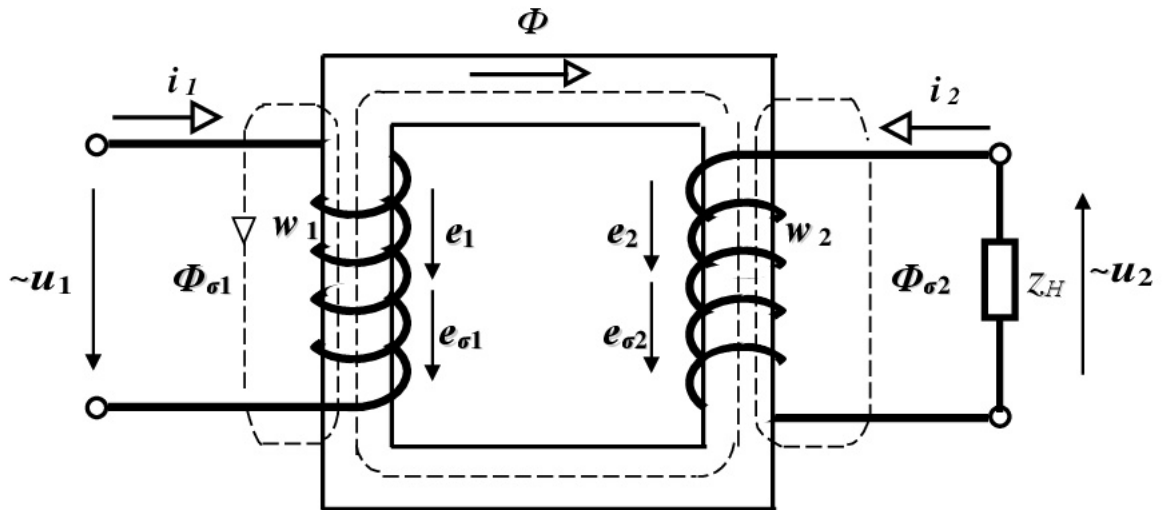


Рисунок 1 – Конструктивна схема трансформатора зі сталевим осердям

Основний магнітний потік наводить у первинній і вторинній обмотках ЕРС відповідно e_1 і e_2 . Магнітні потоки розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$ і $\Phi_{\sigma 2}$ наводять у первинній і вторинній обмотках ЕРС відповідно $e_{\sigma 1}$ і $e_{\sigma 2}$.

Напруга u_1 , прикладена до первинної обмотки, врівноважується спаданням напруги на активному опорі обмотки та електрорушійними силами $e_{\sigma 1}$ і $e_{\sigma 1}$, тобто

$$u_1 = r_1 i_1 + e_{\sigma 1} - e_1 = r_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} - e_1, \quad (1)$$

де $L_{\sigma 1}$ – індуктивність, обумовлена магнітним потоком розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$, Гн.

У вторинній обмотці ЕРС, яка наводяться магнітними потоками Φ і $\Phi_{\sigma 2}$, врівноважується спаданням напруг на активному опорі обмотки та опорі навантаження, тобто

$$e_2 + e_{\sigma 2} = r_2 i_2 + u_2 \quad (2)$$

або

$$e_2 = r_2 i_2 - e_{\sigma 2} + u_2 = r_2 i_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + u_2, \quad (3)$$

де $L_{\sigma 2}$ – індуктивність, обумовлена магнітним потоком розсіювання $\Phi_{\sigma 2}$, Гн.

Замінімо реальний трансформатор еквівалентним конструктивною схемою (рисунок 2).

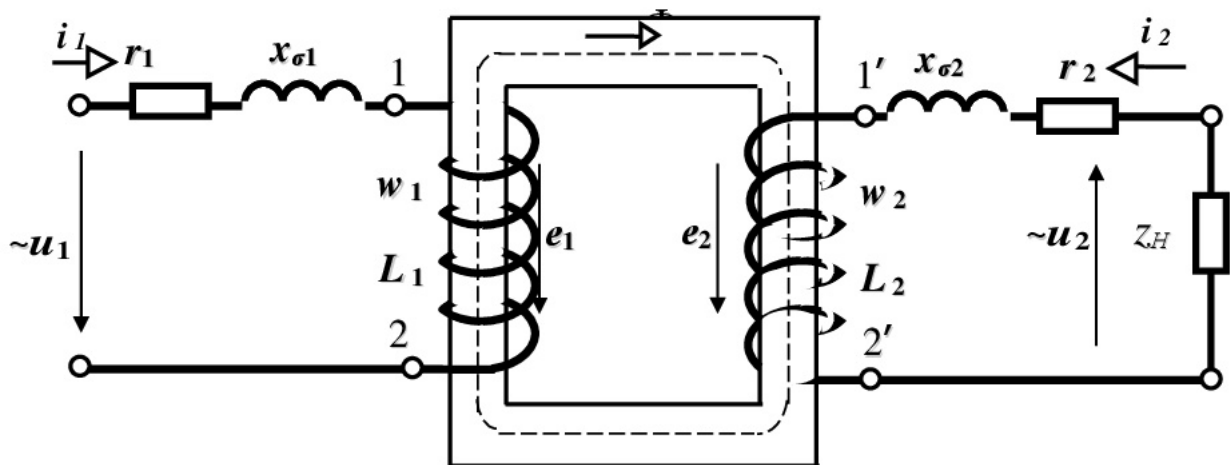


Рисунок 2 – Еквівалентна конструктивна схема трансформатора зі сталевим осердям

Трансформатор із затисками 1–2 і 1'–2' називається ідеальним трансформатором (в якому відсутні втрати на нагрів, від потоків розсіювання).

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f w_1 \Phi_m}{4,44 f w_2 \Phi_m} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (4)$$

Розглянемо спочатку ідеальний трансформатор, у якому $r_1 = 0$; $x_{\sigma 1} = 0$; $r_2 = 0$; $x_{\sigma 2} = 0$; $w_1 = w_2$.

При холостому ході такий трансформатор не відрізняється від звичайної ідеальної котушки і може бути зображений схемою заміщення (рисунк 3).

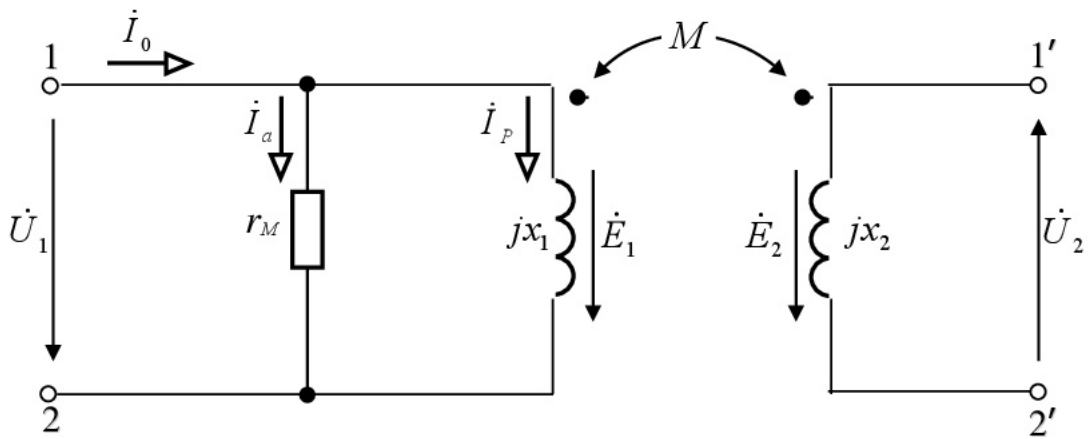


Рисунок 3 – Схема заміщення ідеального трансформатора на холостому ході

Побудуємо векторну діаграму ідеального трансформатора при холостому ході (рисунк 4).

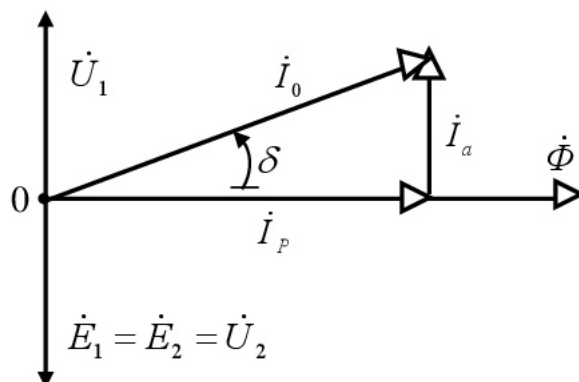


Рисунок 4 – Векторна діаграма ідеального трансформатора при холостому ході

Намагнічуюча сила при холостому ході (у первинній обмотці)

$$\dot{F}_0 = w_1 \dot{I}_0 = Z_m \dot{\Phi}, \quad (5)$$

де Z_m – комплекс магнітного опору осердя, $1/\Gamma H$;

$\dot{\Phi}$ – комплекс основного магнітного потоку, Bb .

Рівняння для первинного контуру

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1. \quad (6)$$

Складемо тепер схему заміщення ідеального трансформатора при його навантаженні (рисунок 5).

Якщо до затисків вторинної обмотки підключити навантаження з опором Z_H , то в ній буде проходити струм \dot{I}_2 , який, у свою чергу, буде намагатися зменшити магнітний потік $\dot{\Phi}$, а це приведе до ЕРС \dot{E}_1 , внаслідок чого струм \dot{I}_1 зросте до такої величини, при якій магнітний потік

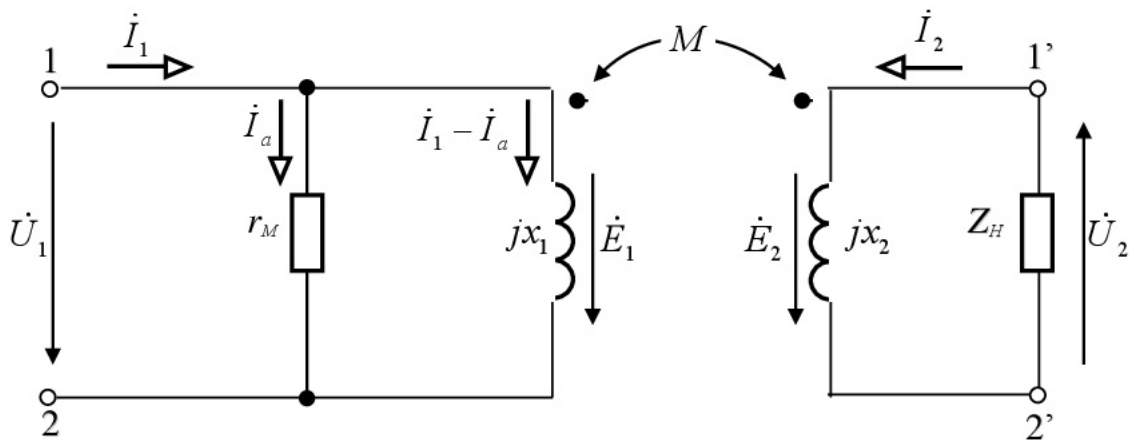


Рисунок 5 – Схема заміщення ідеального трансформатора при навантаженні

$\dot{\Phi}$ набуде початкового значення і буде виконуватися рівняння (6). Таким чином, поява струму у вторинному контурі приводить до збільшення струму в первинному контурі.

У навантаженому трансформаторі магнітний потік у осерді дорівнює магнітному потоку при холостому ході, тобто завжди $\Phi = \text{const}$.

При навантаженні магнітний потік Φ створюється під дією намагнічуючих сил первинної і вторинної обмоток

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 = Z_m \dot{\Phi}. \quad (7)$$

Порівнявши (5) і (6), знаходимо

$$w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 = w_1 \dot{I}_0. \quad (8)$$

При рівності кількості витків первинної і вторинної обмоток

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_0. \quad (9)$$

З рівняння (9)

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2. \quad (10)$$

Побудуємо векторну діаграму ідеального трансформатора при навантаженні (рисунок 6).

Перетворимо схему заміщення ідеального трансформатора, для чого розв'яжемо індуктивний зв'язку. Якщо з'єднати однойменні затиски

обмоток трансформатора між собою, то режим роботи трансформатора не зміниться.

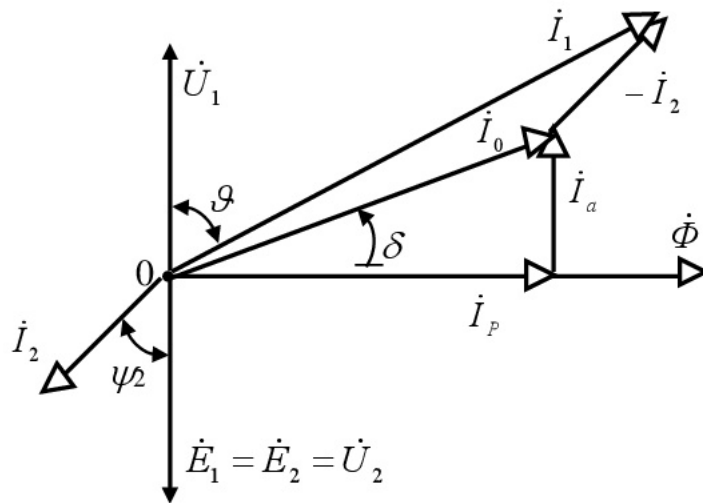


Рисунок 6 – Векторна діаграма ідеального трансформатора при навантаженні

Розглянемо спочатку індуктивно зв'язані елементи, які тепер мають загальну точку. Коефіцієнт зв'язку двох елементів у даному випадку дорівнює одиниці, оскільки весь магнітний потік повністю зчеплений з витками первинної і вторинної обмоток, тобто

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 1, \quad (11)$$

тому, з огляду на те, що $w_1 = w_2$, знаходимо

$$M = L_1 = L_2. \quad (12)$$

Замінімо тепер частину схеми з індуктивно зв'язаними елементами з загальною точкою (рисунок 7а) на еквівалентну схему без індуктивного зв'язку (рисунок 7б). Тепер

$$L_1 - M = 0, \quad L_2 - M = 0, \quad (13)$$

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_a + \dot{I}_2 = \dot{I}_0 - \dot{I}_a = \dot{I}_p. \quad (14)$$

З урахуванням (13), (14) схема заміщення ідеального трансформатора приймає вигляд (рисунок 7в). Розрахункова схема ідеального трансформатора з феромагнітним осердям має вигляд, зображений на рисунку 8.

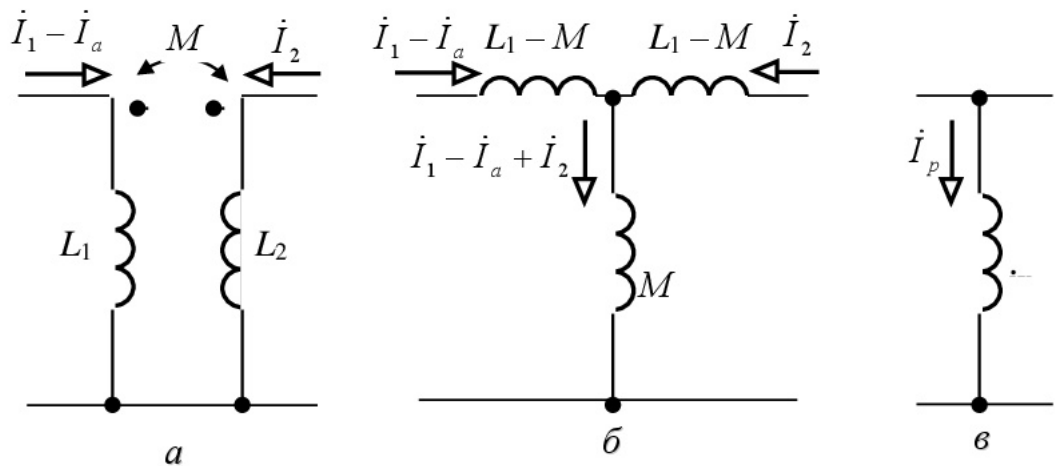


Рисунок 7 – Схеми еквівалентного перетворення ідеального трансформатора

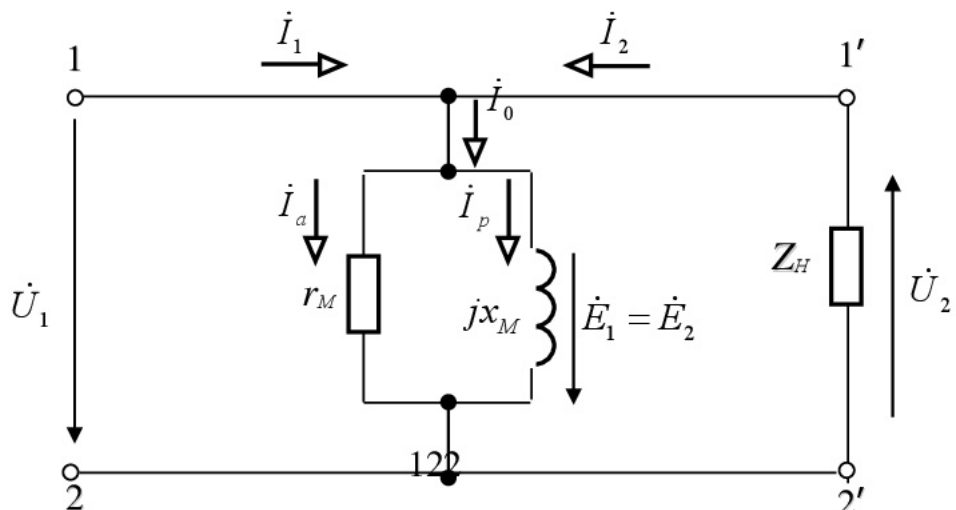


Рисунок 8 – Розрахункова схема ідеального трансформатора

Якщо тепер врахувати активні й індуктивні опори розсіювання обох обмоток, то для трансформатора, у якого $w_1 = w_2$, одержимо схему заміщення, приведену на рисунку 9.

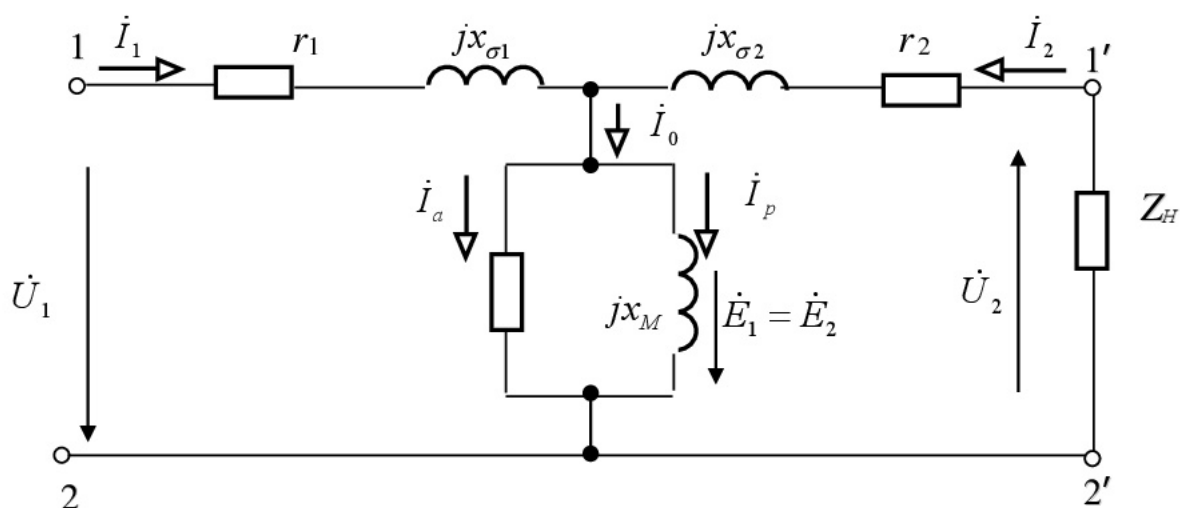


Рисунок 9 – Схема заміщення реального трансформатора з феромагнітним осердям

Побудуємо векторну діаграму кола (рисунок 10).

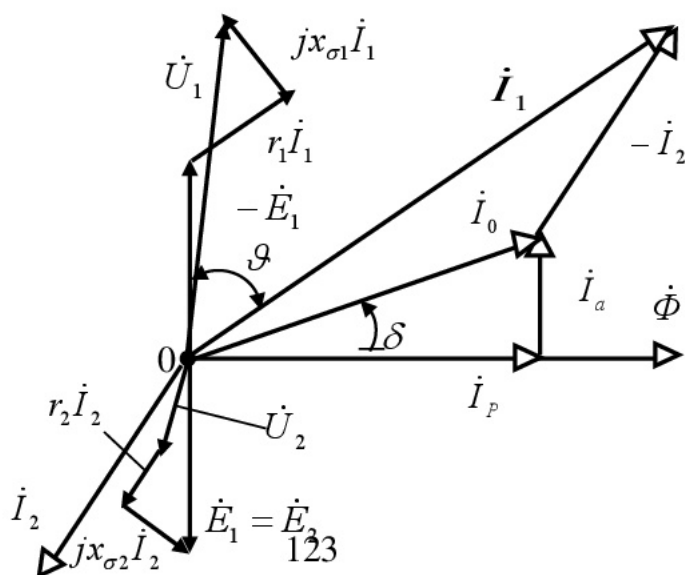


Рисунок 10 – Векторна діаграма напруг і струмів

Запишемо рівняння первинного і вторинного контурів кола:

$$\dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_1 + jx_{\sigma 1} \dot{I}_1 - \dot{E}_1; \quad (15)$$

$$\dot{E}_2 = r_2 \dot{I}_2 + jx_{\sigma 2} \dot{I}_2 + \dot{U}_2. \quad (16)$$

Оскільки в загальному випадку $w_1 \neq w_2$, то і $E_1 \neq E_2$. Це ускладнює аналіз процесів у трансформаторі, тому обидві обмотки трансформатора приводять до однієї кількості витків. Як правило, вторинну обмотку з кількістю витків w_2 приводять до первинної обмотки з кількістю витків w_1 – **приведений трансформатор**. Для цього вторинну обмотку заміняють еквівалентною з кількістю витків w_1 , але змінюють параметри та електричні величини вторинного контуру так, щоб магнітний потік і потужність трансформатора залишилися без змін. Приведені величини позначають так

$$\dot{E}'_2; \dot{I}'_2; r'_2; x'_{\sigma 2}; z'_n; \dot{U}'_2; w'_2.$$

Електрорушійна сила, яка наводиться у вторинній обмотці основним магнітним потоком, дорівнює

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m, \quad (17)$$

звідки

$$\Phi_m = \frac{E_2}{4,44fw_2}. \quad (18)$$

При заміні дійсної вторинної обмотки з кількістю витків w_2 приведеною обмоткою з кількістю витків $w'_2 = w_1$ основний магнітний потік буде наводити в ній електрорушійну силу

$$E'_2 = 4,44fw'_2\Phi_m = 4,44fw'_2 \frac{E_2}{4,44fw_2} = E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_2 k, \quad (19)$$

де k – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Коефіцієнт трансформації дорівнює

$$k = \frac{E_1}{E_2}. \quad (20)$$

Якщо підставити значення k , то одержимо

$$E'_2 = E_1. \quad (21)$$

Аналогічно

$$U'_2 = U_2 k, \quad (22)$$

Оскільки у випадку приведення вторинної обмотки до первинної магнітний потік залишається незмінним, то і вторинна намагнічуюча сила повинна залишатися незмінною, тобто

$$F_2 = w_2 I_2 = w_1 I'_2, \quad (23)$$

Звідки

$$I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}. \quad (24)$$

Через те, що умовою приведення є постійність потужності, то і втрати в провідниках дійсної і приведенної вторинної обмоток повинні бути однаковими, тобто

$$r_2 I_2'^2 = r'_2 I_2'^2, \quad (25)$$

звідки

$$r'_2 = r_2 \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 = r_2 \left(\frac{k I_2}{I_2} \right)^2 = r_2 k^2. \quad (26)$$

Аналогічно

$$x'_{\sigma 2} = x_{\sigma 2} k^2; \quad z'_H = z_H k^2. \quad (27)$$

Запишемо рівняння первинного і вторинного контурів:

$$\dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_1 + j x_{\sigma 1} \dot{I}_1 - \dot{E}_1; \quad (28)$$

$$\dot{E}'_2 = r'_2 \dot{I}'_2 + jx'_{\sigma 2} \dot{I}'_2 + \dot{U}'_2. \quad (29)$$

11). Складемо схему заміщення приведенного трансформатора (рисунок

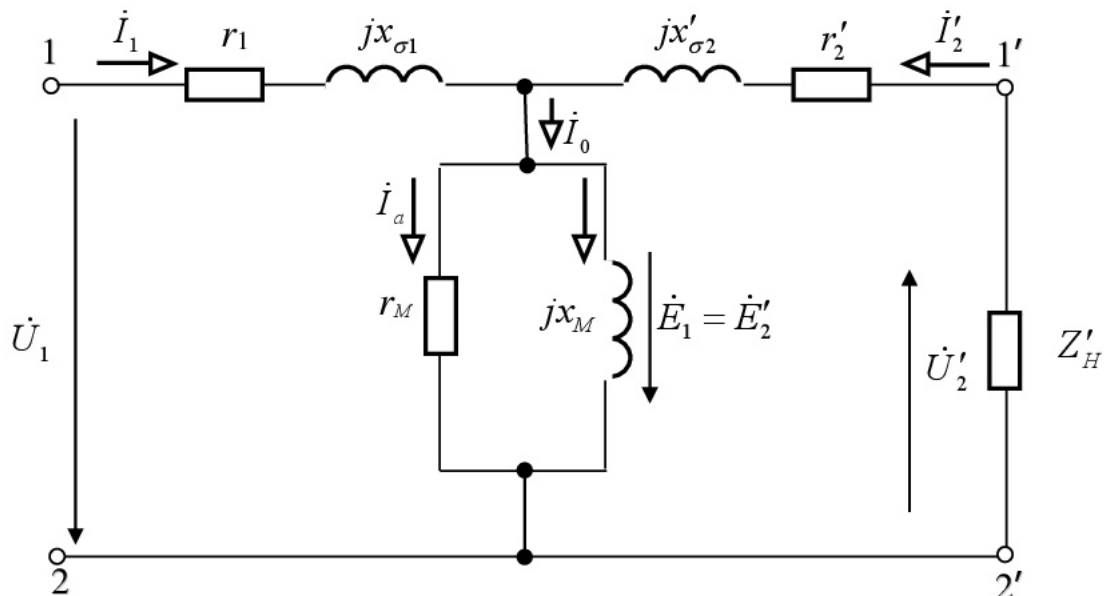


Рисунок. 11 – Схема заміщення приведенного трансформатора

Векторна діаграма приведенного трансформатора має такий же вигляд, як і діаграма, приведена на рисунку10.

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 15 «Нелінійні кола змінного струму» [1: с.186-191], [2: с.110-117].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 15.6, 15.7 [3].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.

- 2 Зібрати схему експериментальної установки дослідження трансформатора з феромагнітним осердям.
- 3 Виконати експериментальне дослідження трансформатора з феромагнітним осердям і результати занести в таблицю 1.
- 4 Виконати необхідні розрахунки по визначенню параметрів і електричних величин еквівалентної розрахункової схеми трансформатора з феромагнітним осердям і результати занести в таблицю 2.
- 5 Оформити звіт та захистити його.

**Уміння, які здобуваються студентами в результаті
виконання експериментального дослідження**

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Знати фізичні явища і процеси, що спостерігаються в обмотках і магнітопроводі трансформатора.
- 4 Знати принцип роботи однофазного трансформатора.
- 5 Уміти за допомогою експериментальних даних розрахувати параметри і фізичні величини розрахункової схеми трансформатора з феромагнітним осердям.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з генератора змінного струму G , лабораторного автотрансформатора TV , амперметрів PA_1 , PA_2 , вольтметрів PV_1 , PV_2 , ватметру PW , навантажувальна котушка K_H , вимикача QS_1 . Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 12.

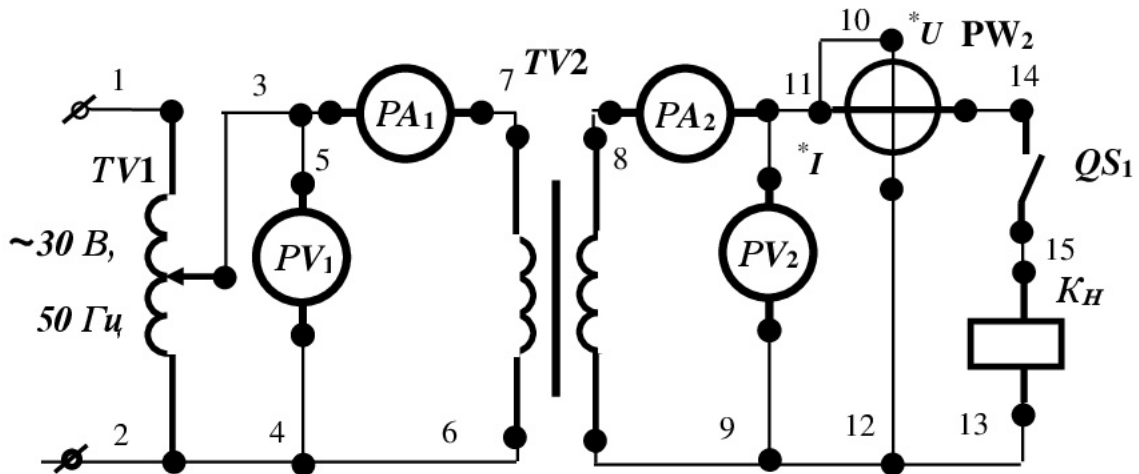


Рисунок 12 - Принципова схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 15 провідників (на схемі позначені номерами 1-15).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів дорівнюють нулю;
- опір обмотки амперметра і обмотки струму ватметра дорівнює нулю;
- опір обмоток вольтметрів і обмотки напруги ватметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у них не протікає.

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки наведена на рисунку 13.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

\dot{U}_1 – напруга на затискачах первинної обмотки трансформатора, B ;

\dot{I}_1 – сила струму в електричному колі первинної обмотки трансформатора, A ;

\dot{U}_2 – напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора, B ;

\dot{I}_2 – сила струму в електричному колі вторинної обмотки

трансформатора, A ;

r_1 – активний опір первинної обмотки, Ω ;

$jx_{\sigma 1}$ – реактивний опір первинної обмотки магнітному потоку розсіювання, Ω ;

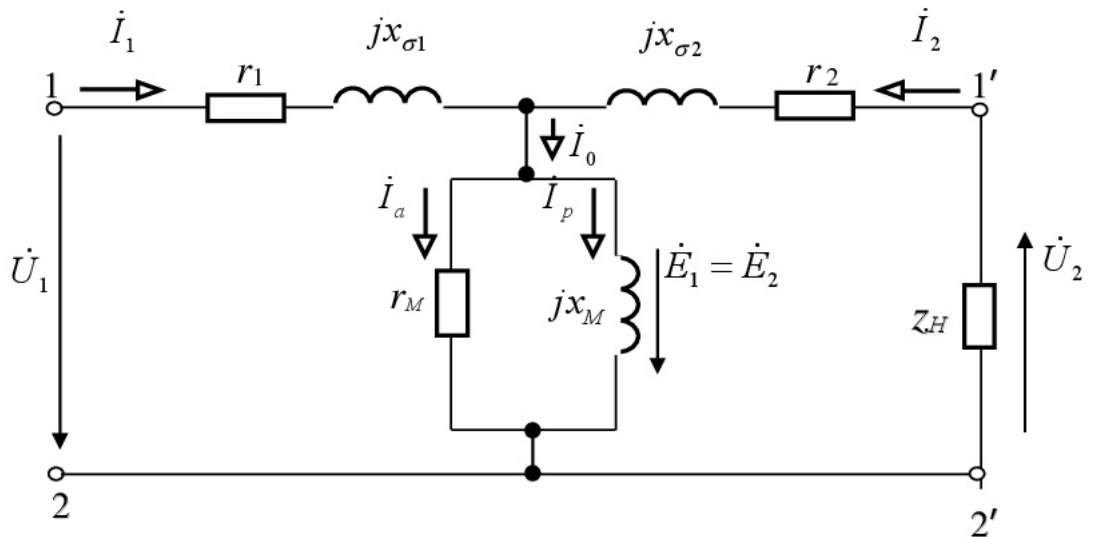


Рисунок 13 - Розрахункова схема електричного кола
експериментальної установки

r_2 – активний опір вторинної обмотки, Ω ;

$jx_{\sigma 2}$ – реактивний опір вторинної обмотки магнітному потоку розсіювання, Ω ;

r_M – активний опір магнітопроводу, Ω ;

jx_M – реактивний опір магнітопроводу котушки, Ω .

\dot{I}_a – активна складова струму, A ;

\dot{I}_p – реактивна складова струму, A ;

Z_H – повний опір навантаження, Ω .

\dot{U}_1 – напруга на затискачах первинної обмотки, V ;

\dot{U}_2 – напруга на затискачах вторинної обмотки, B ;

\dot{I}_1 – сила струму в колі первинної обмотки, A ;

\dot{I}_2 – сила струму в колі вторинної обмотки, A ;

\dot{E}_1 – ЕРС самоіндукції первинної обмотки, B ;

\dot{E}_2 – ЕРС взаємоіндукції вторинної обмотки, B ;

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки при підключенні трансформатора з феромагнітним осердям до джерела змінного струму, наведена на рисунку 6.1.
- 2 Розімкнути вимикач QS_1 (режим холостого ходу трансформатора).
- 3.Подати напругу на затискачі експериментальної установки.
- 4 Встановити напругу за допомогою ЛАТР TV_1 , зняти показання приладів у колі котушки з феромагнітним осердям, результати занести в таблицю 1.
- 5 Навантажувальний реостат R_H ввести повністю.

Таблиця 8.1 – Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів					
	U_1, B	I_1, A	P_1, Bm	U_2, B	I_2, A	P_2, Bm
Вимикач QS_1 розімкнений (режим холостого ходу)						
Вимикач QS_1 замкнений (навантажувальний режим)						

6 Замкнути вимикач QS_1 (навантажувальний режим трансформатора), результати занести в таблицю 1.

7 Записати параметри досліджуваного трансформатора з феромагнітним осереддям в таблицю 2:

Таблиця 2 – Параметри досліджуваного трансформатора з феромагнітним осереддям

w_1	w_2	$r_1, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$

8 Визначити за допомогою експериментальних даних режиму холостого ходу ЕРС взаємоіндукції у вторинній обмотці трансформатора, використовуючи режим холостого ходу і рівняння:

$$U_2 = E_2. \quad (30)$$

9 Визначити амплітуду магнітного потоку у магнітопроводі трансформатора, використовуючи рівняння

$$E_2 = 4,44 f \cdot w_2 \cdot \Phi_m. \quad (31)$$

10 Визначити ЕРС самоіндукції у трансформаторі з феромагнітним осереддям, використовуючи рівняння

$$E_1 = 4,44 f \cdot w_1 \cdot \Phi_m. \quad (32)$$

13 Визначити втрати активної потужності у проводі первинної обмотки для режиму холостого ходу, використовуючи експериментальні дані і

активний опір проводу первинної обмотки трансформатору.

14 Визначити за допомогою розрахункових і експериментальних даних втрати активну потужність, що споживається магнітопроводом котушки з феромагнітним осердям на нагрів, використовуючи експериментальні дані і втрати активної потужності у проводі первинної обмотки.

15 Визначити за допомогою розрахункових даних активну складову струму.

16 Визначити за допомогою розрахункових даних активний опір магнітопроводу котушки з феромагнітним осердям.

17 Визначити за допомогою розрахункових даних реактивну складову струму.

18 Визначити за допомогою розрахункових даних реактивний опір магнітопроводу котушки з феромагнітним осердям.

6.19 Визначити за допомогою розрахункових і експериментальних даних для режиму холостого ходу ЕРС розсіяння, що наводиться потоком розсіяння, яка складає 5% ЕРС самоіндукції первинної обмотки.

20 Визначити за допомогою розрахункових і експериментальних даних для режиму холостого ходу реактивний опір потоку розсіяння первинної обмотки, використовуючи рівняння:

$$x_{\sigma 1} = \frac{E_{\sigma 1}}{I_1}. \quad (33)$$

21 Визначити за допомогою розрахункових і експериментальних даних для режиму холостого ходу ЕРС, що наводиться потоком розсіяння, яка складає 5% ЕРС взаємоіндукції вторинної обмотки.

22. Визначити за допомогою розрахункових і експериментальних даних для режиму холостого ходу реактивний опір потоку розсіяння вторинної

обмотки, використовуючи рівняння:

$$x_{\sigma 2} = \frac{E_{\sigma 2}}{I_2}. \quad (34)$$

23 Визначити повний опір навантаження за допомогою експериментальних даних для навантажувального режиму, використовуючи закон Ома.

24 Визначити активний опір навантаження, використовуючи рівняння

$$P_2 = r_n \cdot I_2^2. \quad (35)$$

25 Визначити реактивний опір навантаження за допомогою розрахункових даних для навантажувального режиму, використовуючи рівняння:

$$Z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2}. \quad (36)$$

14 Визначити кут зсуву фаз навантаження за допомогою розрахункових даних для навантажувального режиму, використовуючи рівняння, використовуючи рівняння

$$\varphi = \arccos \frac{r_n}{Z_n}. \quad (37)$$

15 Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора за допомогою рівняння:

$$K = \frac{w_1}{w_2} . \quad (38)$$

6.16 Результати розрахунку електричного кола занести в таблицю 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку електричного кола

Фізичні величини, що характеризують коло							
$\Phi_m, Bб$	E_L, B	$P_{np.1}$ Bm	$P_m,$ Bm	I_{ϕ}, A	$r_m, Ом$	$E_{\sigma 1}, B$	$x_{\sigma 1},$ $Ом$

Продовження таблиці 3

Фізичні величини, що характеризують коло							
E_2, B	$E_{\sigma 2}, B$	$x_{\sigma 2},$ $Ом$	K	$r_n, Ом$	$x_n, Ом$	$z_n, Ом$	$\varphi_n,$ $град$

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Мета лабораторної роботи.
- 3 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 4 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.
- 5 Таблиця 1.
- 6 Таблиця 2.
- 7 Таблиця 3.
- 8 Висновок щодо явища, що лежить в основі принципу дії трансформатора і призначення трансформатора.

Контрольні запитання

- 1 Як побудований однофазний трансформатор з феромагнітним магнітопроводом?
- 2 Які явища спостерігаються в первинному контурі трансформатора з феромагнітним магнітопроводом?
- 3 Які явища спостерігаються у вторинному контурі трансформатора з феромагнітним магнітопроводом?
- 4 Які явища спостерігаються в магнітопроводі трансформатора з феромагнітним осердям?
- 5 Складіть конструктивну схему трансформатора з феромагнітним осердям та покажіть всі фізичні величини.
- 6 Яке призначення первинної обмотки трансформатора?
- 7 Яке призначення вторинної обмотки трансформатора?
- 8 Яке призначення феромагнітного осердя трансформатора?
- 9 Яке фізичне явище лежить в основі принципу дії трансформатора? Сформулюйте його.
- 10 Який принцип дії трансформатора з феромагнітним магнітопроводом?
- 11 Складіть розрахункову схему трансформатора з феромагнітним осердям.
- 12 Запишіть рівняння рівноваги первинного контуру для миттєвих значень.
- 13 Запишіть рівняння рівноваги первинного контуру в комплексній формі.
- 14 Запишіть рівняння рівноваги вторинного контуру для миттєвих значень.
- 15 Запишіть рівняння рівноваги вторинного контуру в комплексній формі.
- 16 Побудуйте якісно векторну діаграму трансформатора з феромагнітним осердям з однаковою кількістю витків первинної і вторинної обмоток.
- 17 Що таке коефіцієнт трансформації трансформатора?
- 18 Як визначити діюче значення ЕРС самоіндукції трансформатора?

- 19 Як визначити діюче значення ЕРС взаємоіндукції трансформатора?
- 20 Як визначити амплітуду магнітного потоку в магнітопроводі трансформатора?
- 21 Які втрати потужності мають місце в основних частинах трансформатора?
- 22 Чому при зміні струму у вторинному колі трансформатора автоматично змінюється і струм у первинному колі?
- 23 Який трансформатор називають приведеним?
- 24 Як визначити приведену ЕРС вторинної обмотки трансформатора?
- 25 Як визначити приведений струм вторинної обмотки трансформатора?
- 26 Як визначити приведений активний, реактивний опір вторинної обмотки трансформатора?
- 27 Як визначити приведений повний опір навантаження, підключеного до вторинної обмотки трансформатора?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
- 2 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1970. – 592 с.
- 3 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання з теми 15 «Нелінійні кола змінного струму». / І.О. Попова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 55 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В КОТУШЦІ У ЛІНІЙНИХ КОЛАХ З ПОСТІЙНОЮ ЕРС

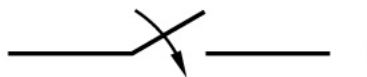
Мета роботи:

Придбання практичних навичок при дослідженні перехідних процесів в котушці у лінійних колах з постійною електрорушійною силою.

Основні теоретичні відомості

Під **перехідними процесами** розуміють процеси переходу від одного усталеного режиму роботи електричного кола до іншого, будь чим відрізняється від попереднього: величиною ЕРС, параметрами тощо. Перехідні процеси виникають внаслідок включення або вимикання пасивних або активних ділянок кола; коротких замикань окремих ділянок кола, різного роду переключень, раптової зміни параметрів і т.п. Всі ці зміни називаються **комутаційними змінами** або просто **комутацією**.

Замикання кола зображують на розрахункових схемах так:



Розмикання кола зображують на розрахункових схемах так:



Будемо вважати, що при замиканні і розмиканні електричного кола дуга не виникає, а комутація проходить у момент часу $t = 0$.

Розглянемо включення ділянки кола з котушкою (рисунок 1).

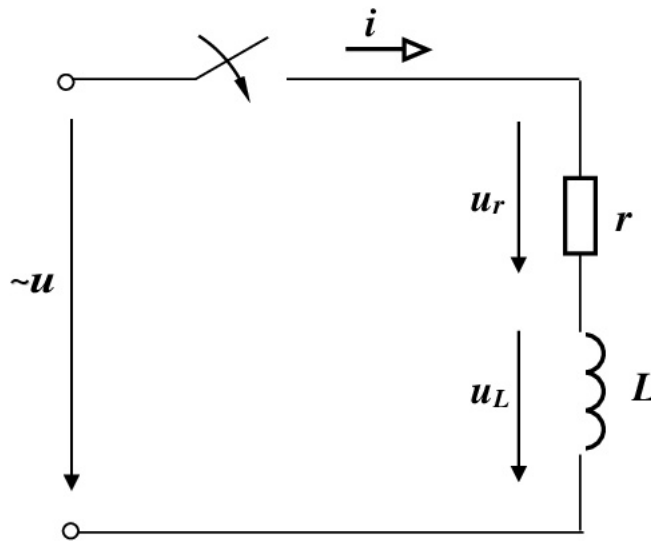


Рисунок 1 – Розрахункова схема включення ділянки кола
з котушкою

До комутації струм у електричному колі дорівнював нулю. Після комутації у відповідності з другим законом Кірхгофа можемо записати

$$u = u_r + u_L. \quad (1)$$

Якщо припустити, що в момент комутації ($t = 0$) струм зміниться стрибком, то $u = \infty$ і другий закон Кірхгофа не буде виконуватися. Тому в даному випадку в момент комутації сила струму дорівнює нулю.

З енергетичної точки зору неможливість миттєвої зміни струму в індуктивності пояснюється неможливістю зміни стрибком енергії, накопиченої в котушці. Енергія магнітного поля котушки

$$W_L = \frac{Li^2}{2}. \quad (2)$$

Миттєва потужність в індуктивності

$$p_L = \frac{dW_L}{dt} = Li \frac{di}{dt}. \quad (3)$$

Якби струм у момент часу $t = 0$ змінився стрибком, це привело б до виділення в індуктивності нескінченно великої потужності, що неможливо з фізичної точки зору.

Таким чином, можна сформулювати **перший закон комутації**: у будь-якому розгалуженні з індуктивністю струм і магнітний потік у момент комутації зберігають ті значення, які вони мали до комутації, і далі починають змінюватися від цих значень.

Розглянемо тепер включення ділянки кола з ємністю (рисунок 2).

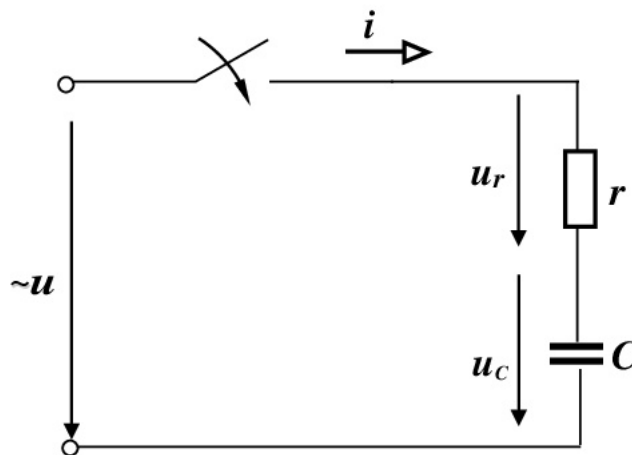


Рисунок 2 – Розрахункова схема включення ділянки кола з ємністю

До комутації напруга на ємності дорівнювала нулю. Після комутації у відповідності з другим законом Кірхгофа можемо записати

$$u = u_r + u_C = r i + u_C. \quad (4)$$

Зі співвідношень

$$u_C = \frac{q}{C}, \quad i = \frac{dq}{dt}, \quad (5)$$

знаходимо

$$q = Cu_C, \quad i = C \frac{du_C}{dt}. \quad (6)$$

Якщо припустити, що в момент комутації ($t = 0$) напруга на ємності зміниться стрибком, то $i = \infty$ і другий закон Кірхгофа не буде виконуватися. Тому в даному випадку в момент комутації напруга на ємності буде дорівнювати нулю.

З енергетичної точки зору неможливість миттєвої зміни напруги на ємності пояснюється неможливістю зміни стрибком потужності, накопиченої в конденсаторі. Енергія електричного поля конденсатора

$$W_C = \frac{Cu_C^2}{2}. \quad (7)$$

Миттєва потужність у ємності

$$p_C = \frac{dW_C}{dt} = Cu_C \frac{du_C}{dt}. \quad (8)$$

Якби напруга на ємності в момент часу $t = 0$ змінилася стрибком, то це привело б до виділення в ємності нескінченно великої потужності, що неможливо з фізичної точки зору.

Отже, можна сформулювати **другий закон комутації**: на будь-якій ділянці кола з ємністю напруга і заряд на ємності в момент

комутації зберігають ті значення, які вони мали до комутації, і далі починають змінюватися від цих значень.

Розглянемо послідовне коло, яке містить активний опір, індуктивність і ємність, підключені до джерела напруги, яка змінюється в часі за довільним безперервним законом, заданим яким-небудь аналітичним виразом (рисунок 3).

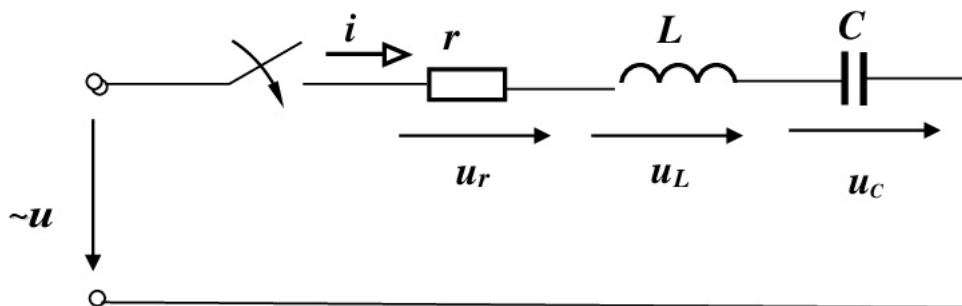


Рисунок 3 – Розрахункова схема послідовно з'єднаних активного опору, індуктивності і ємності

Для будь-якого моменту часу за другим законом Кірхгофа можемо записати

$$u = u_r + u_L + u_C = u = ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt, \quad (9)$$

де i – струм перехідного режиму, який далі будемо називати перехідним струмом або просто струмом, A .

Перехідним режимом будемо називати стан кола, який буде спостерігатися в ньому протягом деякого (теоретично нескінченно великого) часу після комутації.

Коли настає примусовий режим, рівняння (9) приймає вигляд

$$u = ri_{np} + L \frac{di_{np}}{dt} + \frac{1}{C} \int i_{np} dt, \quad (10)$$

де i_{np} – струм примусового режиму або просто примушений струм, А.

Примусовим режимом будемо називати стан кола, коли з перехідним режимом можна не рахуватись. Примусовий режим, який створюється вільною складовою періодичної напруги, інколи називають усталеним режимом.

Віднімаючи почленно рівняння (9) і (10) та знаючи, що

$$i - i_{np} = i_e, \quad (11)$$

одержимо

$$0 = ri_e + L \frac{di_e}{dt} + \frac{1}{C} \int i_e dt, \quad (12)$$

або

$$0 = u_{r_e} + u_{L_e} + u_{C_e}. \quad (13)$$

Різниця струмів і напруг перехідного і примусового режимів називається відповідно **струмом і напругою вільного режиму** або просто **вільними струмом і напругою**.

Відповідно до рівняння (11) процес, який проходить у колі, можна розглядати як такий, що складається з накладених один на інший процесів – примусового, який наступив як би відразу, та вільного, який має місце тільки протягом перехідного режиму.

Звичайно, фізично існує тільки перехідний струм або напруга, а розкладання їх на примусову і вільну складові – це усього лише зручний спосіб, який полегшує розрахунки перехідних процесів у лінійних колах.

Розкладання перехідних струмів і напруг відповідає правилу рішення лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь, відповідно до якого загальне рішення таких рівнянь дорівнює сумі часткового рішення неоднорідного рівняння і загального рішення однорідного рівняння.

Дійсно, рівняння (12) показує, що вільний струм являє собою загальне рішення однорідного диференціального рівняння і повинний мати постійні інтегрування, кількість яких дорівнює порядку диференціального рівняння. У свою чергу рівняння (10) показує, що примусовий струм являє собою відповідне часткове рішення неоднорідного диференціального рівняння.

Класичний метод дослідження перехідних процесів зводиться до інтегрування диференціальних рівнянь, які пов'язують напруги і струми кола в перехідному процесі. В результаті інтегрування з'являються постійні, які знаходяться з початкових умов.

Незалежні початкові умови виходять із законів комутації, залежні – з незалежних початкових умов і значень ЕРС за допомогою першого і другого законів Кірхгофа.

Дослідимо перехідний процес підключення котушки до джерела постійної ЕРС, розрахункова схема якого показана на рисунку 4.

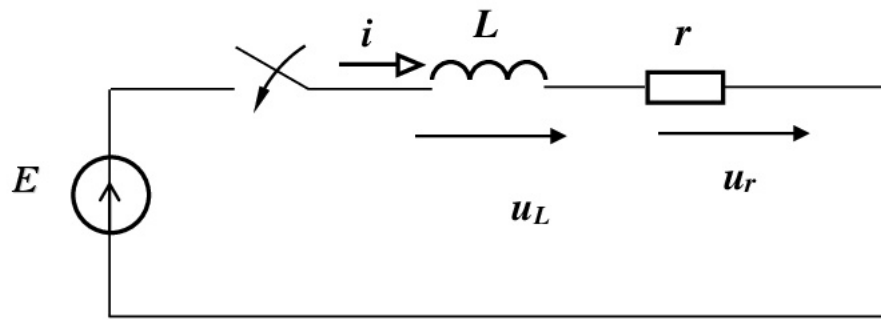


Рисунок 4 – Розрахункова схема перехідного процесу підключення котушки до джерела постійної ЕРС

У післякомутаційний період у відповідності з другим законом Кірхгофа можемо записати

$$L \frac{di}{dt} + ri = E, \quad (14)$$

або

$$\tau \frac{di}{dt} + i = \frac{E}{r}, \quad (15)$$

де

$$\tau = \frac{L}{r}. \quad (16)$$

Рівняння (15) являє собою звичайне лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами.

Складаємо характеристичне рівняння

$$\tau \cdot p + 1 = 0, \quad (17)$$

звідки знаходимо корінь

$$p = -\frac{1}{\tau}. \quad (18)$$

Перехідний струм дорівнює сумі примусового і вільного струмів

$$i = i_{np} + i_{\varepsilon}. \quad (19)$$

Оскільки характеристичне рівняння має один корінь, то вільний струм можна виразити так

$$i_{\varepsilon} = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (20)$$

де A – постійна інтегрування струму, А.

Примусовий струм після комутації

$$i_{np} = \frac{E}{r}, \quad (21)$$

тому рівняння перехідного струму в колі у загальному вигляді

$$i = \frac{E}{r} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (22)$$

Для розрахунку постійної інтегрування A знайдемо початкові умови: відповідно до першого закону комутації на ділянці кола з індуктивністю

струм не може змінюватися стрибком, тому в момент комутації при $t = 0$, $i(0) = 0$ рівняння (22) запишеться так

$$0 = \frac{E}{r} + A, \quad (23)$$

звідки постійна інтегрування струму

$$A = -\frac{E}{r}, \quad (24)$$

тобто вільна складова струму

$$i_{\text{в}} = -\frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (25)$$

Підставляємо значення постійної інтегрування в рівняння (22) одержуємо рівняння перехідного струму, будуємо графіки примусової, вільної складових і перехідного струму в часі (рисунки 5)

$$i = i_{np} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (26)$$

У рівнянні перехідного процесу величина τ називається **постійною часу** кола. Вона характеризує швидкість перехідного процесу

$$[\tau] = \frac{L_{\text{н}}}{O_{\text{м}}} = \frac{O_{\text{м}} \cdot c}{O_{\text{м}}} = c.$$

Після визначення струму легко знайти напруги на активному опорі та індуктивності

$$u_r = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right); \quad (27)$$

$$u_L = E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (28)$$

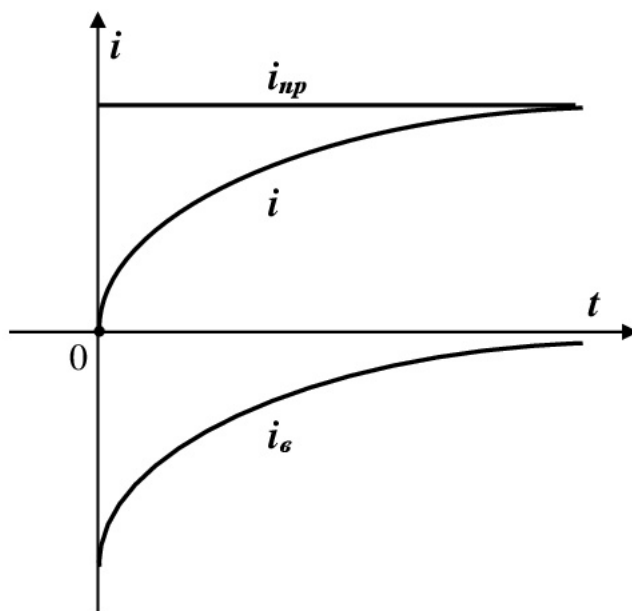


Рисунок 5 – Графіки примусової, вільної складових і перехідного струму в часі

З рівняння (28) видно, що напруга на індуктивності змінюється стрибком від нуля до значення ЕРС джерела. ЕРС самоіндукції протидіє зростанню струму.

З рівняння (27) видно, що напруга на активному опорі зростає плавно від нуля до значення ЕРС джерела в примусовому режимі.

Енергія, яку одержує коло, частково йде на створення енергії магнітного поля, а частково перетворюється в теплоту на активному опорі.

За час перехідного періоду в магнітному полі котушки накопичиться енергія

$$W_L = \frac{Li_{np}^2}{2}. \quad (29)$$

Нехай у колі, розрахункова схема якого приведена на рисунку 6, ключ був у положенні 1 і джерело було підключено досить довго, тобто наступив ustalений режим. Якщо в деякий момент часу ($t = 0$) ключ миттєво (без розриву кола котушки) переключити в положення 2, то буде мати місце **коротке замикання котушки**.

Знайдемо закон зміни струму в колі. Для післякомутаційної схеми за другим законом Кірхгофа можемо записати

$$L \frac{di}{dt} + ri = 0, \quad (30)$$

або

$$\tau \frac{di}{dt} + i = 0. \quad (31)$$

Рівняння (31) являє собою однорідне диференціальне рівняння, рішення якого дає вільний струм. Таким чином, у даному випадку перехідний струм не буде містити примусової складової, тобто $i = i_{np} + i_s = i_s$, оскільки $i_{np} = 0$.

Після рішення рівняння одержимо характеристичне рівняння, корінь характеристичного рівняння та рівняння струму у загальному вигляді

$$\varphi p + 1 = 0; \quad p = -\frac{1}{\tau}; \quad i = Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (32)$$

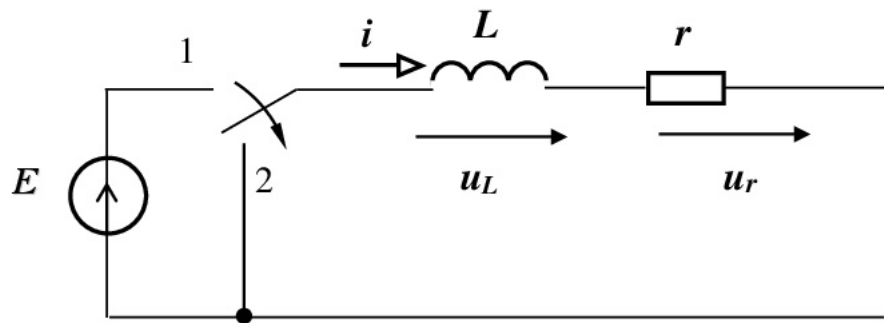


Рисунок 4 – Розрахункова схема перехідного процесу короткого замикання котушки

Знайдемо постійну інтегрування з початкових умов: відповідно до першого закону комутації на ділянці кола з індуктивністю струм не може змінюватися стрибком, тому в момент комутації при $t = 0$ $i(0) = \frac{E}{r}$ і рівнянь (32) запишеться так

$$\frac{E}{r} = A. \quad (33)$$

Остаточно одержимо рівняння перехідного струму при короткому замиканні котушки

$$i = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (34)$$

де постійна інтегрування струму

$$I_0 = \frac{E}{r}. \quad (35)$$

Покажемо перехідний струм на графіку (рисунок 7).

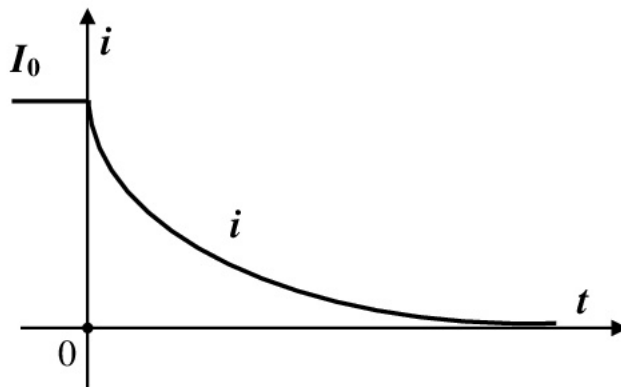


Рисунок 7 – Графік перехідного струму при короткому замиканні котушки

Після визначення рівняння перехідного струму легко знайти рівняння перехідної напругу на активному опорі та індуктивності котушки

$$u_r = E e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (36)$$

$$u_L = -E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (37)$$

З рівняння (37) видно, що напруга на індуктивності та ЕРС самоіндукції в момент комутації змінюються стрибком. ЕРС самоіндукції підтримує протікання струму у колі в попередньому напрямку.

Початковий запас енергії магнітного поля котушки дорівнює

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{LE^2}{2r^2}. \quad (38)$$

Енергія, що виділяється в активному опорі за час перехідного процесу дорівнює

$$W_r = \int_0^\infty ri^2 dt = \frac{E^2}{r} \int_0^\infty e^{-\frac{2}{r}t} dt = -\frac{E^2 \tau}{2r} \Big|_0^\infty = \frac{LE^2}{2r^2}. \quad (39)$$

Таким чином, енергія, що виділяється в активному опорі котушки W_r і енергія магнітного поля котушки W_L рівня, тобто вся енергія магнітного поля виділяється в активному опорі r у вигляді теплоти.

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 16 «Перехідні процеси в лінійних колах [1: с.193-200], [2: с.331-334], [3: с.435-442].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 16.1, 16.2 [4].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитися з приладами та апаратурою експериментальної установки, у якій періодично за допомогою перемикача поляризованого реле, будуть

чергуватися процеси підключення котушки до джерела постійної електрорушійної сили і короткого замикання.

2 Підключити експериментальну установку до джерела постійної напруги, поляризоване реле до джерела змінної напруги із частотою 50 Гц.

3 Установити зазначені викладачем значення опорів зарядного резистора і розрядного резистора.

4 Включити осцилограф і подивитися на екрані криві зміни сили струму і напруги в колі з котушкою при включенні і короткому замиканні на резистор.

5 Виконати експериментальне дослідження, результати занести в таблицю 1.

6 Розрахувати фізичні величини, що характеризують коло при включенні котушки до джерела постійної ЕРС і при короткому замикання.

7 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.

2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.

3 Уміти проаналізувати фізичні процеси, що відбуваються у електричному колі при включенні котушки до джерела постійної ЕРС і короткому замиканні.

5. Уміти визначити фізичні величини, що характеризують коло при включенні котушки і короткому замиканні за допомогою експериментальних даних.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з наступних елементів: джерела постійної напруги 4-6 В, джерела живлення змінної напруги 30 В, резисторів R_3 в колі вмикання котушки і R_P в колі короткого замикання котушки, однополюсного рубильника QS_1 , K , поляризованого реле KV , перемикача QS_2 , осцилографа, вольтметрів PV_1 , PV_2 , лабораторний автотрансформатор TV . Принципова електрична схема експериментальної установки на рисунку 8.

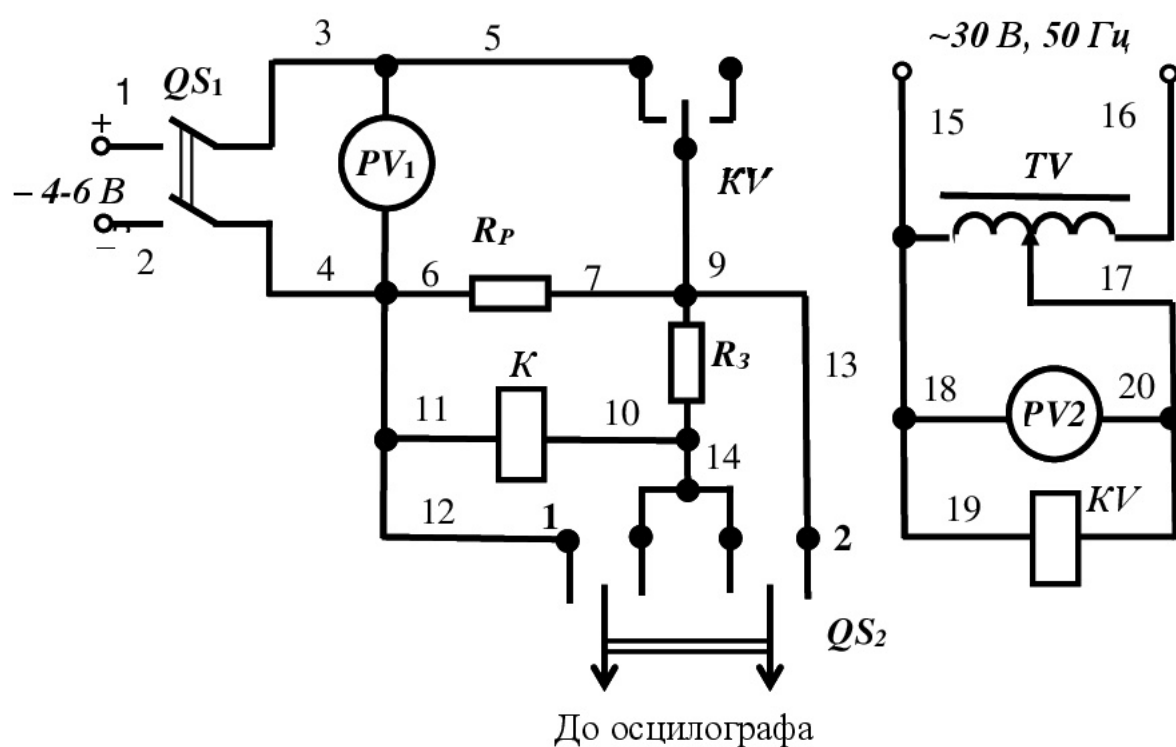


Рисунок 8 - Принципова електрична схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 20 провідників (на схемі позначені номерами 1-20).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у ньому не протікає.

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при включенні перемикача QS_2 в положення 1 - рисунок 9а і при включенні перемикача QS_2 в положення 2 має вигляд, наведений на рисунку 9б.

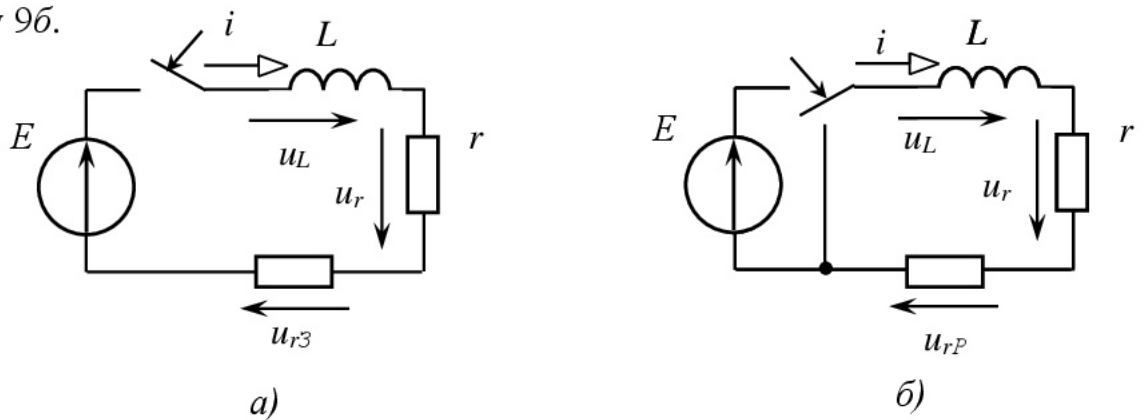


Рисунок 9 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

E – ЕРС джерела живлення, В;

r – активний опір котушки, Ом;

L – індуктивність котушки, Гн,

r_3 – активний опір резистора при включенні котушки, Ом;

r_P – активний опір резистора при короткому замиканні котушки, Ом;

i – перехідний струм, А;

u_r – напруга на активному опорі котушки, В;

u_L – напруга на індуктивності котушки, В;

u_{r3} – напруга на активному опорі резистора при включенні котушки, В;
 u_{rP} – напруга на активному опорі резистора при короткому замиканні котушки, В;

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему експериментальної установки.
2. Підключити експериментальну установку до джерела постійної напруги, а поляризоване реле до джерела змінної напруги із частотою 50 Гц.
3. Установити зазначені викладачем значення опорів резисторів R_3 , R_P .
4. Включити осцилограф і подивитися на екрані криві зміни сили струму і напруги в колі з котушкою при включенні.
5. Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	$r_3, \text{Ом}$	$r_P, \text{Ом}$	$U_I, \text{В}$
Перемикач QSI замкнений			

6. Запишіть параметри котушки: активний опір r , індуктивність L .
7. Визначити активний опір електричного кола при включенні котушки до джерела живлення, використовуючи рівняння

$$r_B = r + r_3, \quad (40)$$

де r – активний опір котушки, Ом;

r_3 – опір реостату при включенні котушки, Ом;

8 Визначити за допомогою експериментальних даних ЕРС джерела живлення E , використовуючи рівняння

$$U_1 = E, \quad (41)$$

9 Визначити постійну часу перехідного процесу τ_B при підключенні котушки до джерела постійної ЕРС, використовуючи рівняння

$$\tau_B = \frac{L}{r_B}. \quad (42)$$

10 Визначити корінь характеристичного рівняння p_B за допомогою експериментальних даних, використовуючи рівняння

$$p_B = -\frac{1}{\tau_B}. \quad (43)$$

11 Визначити примусовий струм i_{np} при підключенні котушки до джерела постійної ЕРС за допомогою експериментальних даних.

12 Визначити постійну інтегрування вільного струму при підключенні котушки до джерела постійної ЕРС за допомогою експериментальних даних.

13 Записати рівняння перехідного струму $i(t)$ при підключенні котушки до джерела постійної ЕРС

14 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2 - Результати розрахунку електричного кола при включенні котушки

Фізичні величини, що характеризують коло при включенні
--

катушки						
$E,$ B	$\tau_B,$ c	$p_B,$ $1/c$	$r_B,$ $Ом$	$i_{np},$ A	$A,$ A	$i(t), A$

15 Визначити активний опір електричного кола при короткому замиканні катушки, використовуючи рівняння:

$$r_K = r + r_P, \quad (44)$$

де r_P - опір реостату при короткому замиканні катушки, $Ом$;

16 Визначити постійну часу перехідного процесу τ_K при короткому замиканні катушки, використовуючи рівняння

$$\tau_K = \frac{L}{r_K}. \quad (45)$$

17 Визначити корінь характеристичного рівняння p_K за допомогою експериментальних даних, використовуючи рівняння

$$p_K = -\frac{1}{\tau_K}. \quad (46)$$

18. Визначити примусовий струм i_{np} при короткому замиканні катушки за допомогою експериментальних даних.

19 Визначити постійну інтегрування вільного струму при короткому замиканні катушки за допомогою експериментальних даних.

20. Записати рівняння перехідного струму $i(t)$ при короткому замиканні котушки.

21 Занести отримані значення в таблицю 3.

Таблиця 3 - Результати розрахунку електричного кола при короткому замиканні котушки

Фізичні величини, що характеризують коло при короткому замиканні котушки						
$E,$ B	$\tau_K,$ c	$R_K,$ $1/c$	$r_K,$ Ω	$i_{np},$ A	$A,$ A	$i(t), A$

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 3 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.
- 4 Таблиця 1.
- 5 Таблиця 2.
- 6 Таблиця 3.
- 7 Висновок щодо параметрів, від яких залежить час перехідного процесу у котушці при її включенні і короткому замиканні.

Контрольні запитання

- 1 Що розуміється під перехідними процесами?
- 2 Що розуміється під комутацією?

- 3 Якими величинами (миттєвими, діючими або максимальними) позначаються фізичні величини на розрахункових схемах електричного струму?
- 4 Сформулюйте 1-й закон комутації.
- 5 Чому енергія, накопичена магнітним полем котушки не може змінитися миттєво?
- 6 Складіть розрахункову схему для дослідження перехідного процесу підключення котушки до джерела постійної ЕРС.
- 7 Складіть диференціальне рівняння електричного кола при включенні котушки до джерела постійної ЕРС в післякомутаційний період.
- 8 Складіть характеристичне рівняння кола при включенні котушки до джерела постійної ЕРС в післякомутаційний період.
- 10 Як розрахувати постійну часу перехідного процесу при включенні котушки?
- 11 Як визначити корінь характеристичного рівняння?
- 12 Запишіть рівняння для розрахунку примусової складової струму при включенні котушки до джерела постійної ЕРС.
- 13 Запишіть рівняння вільної складової струму при включенні котушки до джерела постійної ЕРС.
- 14 Який закон використовується для визначення незалежних початкових умов перехідного процесу в електричному колі при включенні котушки до джерела постійної ЕРС?
- 15 Як знайти залежні початкові умови струму в колі котушки при включенні котушки до джерела постійної ЕРС?
- 16 Яке загальне рішення рівняння перехідного струму в електричному колі при включенні котушки до джерела постійної ЕРС?
- 17 Як визначити постійну інтегрування сили струму при включенні котушки до джерела постійної ЕРС, записавши початкові умови?

- 18 Яка одиниця виміру постійну інтегрування сили струму при включенні котушки до джерела постійної ЕРС.
- 19 Запишіть рівняння перехідного струму при включенні котушки до джерела постійної ЕРС.
- 20 Складіть розрахункову схему для дослідження перехідного процесу при короткому замиканні котушки.
- 21 Складіть диференціальне рівняння електричного кола при короткому замиканні котушки в післякомутаційний період.
- 22 Складіть характеристичне рівняння кола при короткому замиканні котушки в післякомутаційний період.
- 23 Як розрахувати постійну часу перехідного процесу при короткому замиканні котушки?
- 24 Як визначити корінь диференціального рівняння при короткому замиканні котушки?
- 25 Як розрахувати примусову складову струму при короткому замиканні котушки.
- 26 Який вигляд має рівняння вільної складової струму при короткому замиканні котушки?
- 27 Чому дорівнює вільна складова сили струму при закінченні перехідного процесу при короткому замиканні котушки.?
- 28 Як знайти незалежні початкові умови в колі при короткому замиканні котушки?
- 29 Як визначити залежні початкові умови в колі при короткому замиканні котушки?
- 30 Який вигляд має загальне рішення перехідного струму при короткому замиканні котушки?
- 31 Як визначити постійну інтегрування струму, записавши початкові умови при короткому замиканні котушки?

- 32 Як визначити активний опір електричного кола при включенні котушки до джерела живлення?
- 33 Як визначити активний опір електричного кола при короткому замиканні котушки відключеної від джерела живлення?
- 34 Яку функцію в електричному колі дослідження перехідного процесу у котушці виконує поляризоване реле?
- 35 Як визначити постійну часу з графіку перехідного струму при включенні котушки до джерела живлення і при короткому замиканні котушки відключеної від джерела живлення?
- 36 Чому дорівнює реактивний опір індуктивної котушки при включенні до мережі постійного струму?
- 37 Як визначити енергію, накопичену у магнітному полі котушки при включенні котушки до джерела живлення?
- 38 Як визначити енергію, що виділяється в активному опорі за час перехідного процесу?
- 39 Чому дорівнює різниця між енергією, накопиченою у магнітному полі котушки і енергією, що виділяється в активному опорі за час перехідного процесу?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1970. – 592 с.

4 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання з теми 16 «Перехідні процеси в лінійних колах» /І.О. Попова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 72 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ І РОЗРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ З ПОСТІЙНОЮ ЕРС

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при дослідженні перехідних процесів зарядження і розрядження конденсатора через резистор в лінійних колах з постійною ЕРС

Основні теоретичні відомості

Розглянемо розрахункову схему послідовного з'єднання активного опору і ємності ідеального конденсатора **при зарядженні конденсатора через резистор** в колі з постійною ЕРС (рисунок 1).

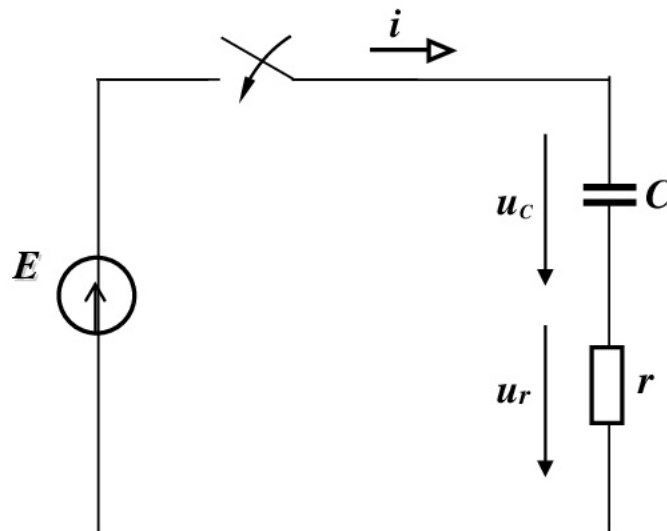


Рисунок 1 – Розрахункова схема перехідного процесу у колі з послідовно з'єднаними активним опором і ємністю при зарядженні конденсатора через резистор в колі з постійною

ЕРС

Знайдемо закон зміни напруги на ємності після комутації. Запишемо для кола після комутації рівняння за другим законом Кірхгофа

$$u_r + u_C = E. \quad (1)$$

Враховуючи, що напруга на активному опорі дорівнює

$$u_r = ri = rC \frac{du_C}{dt} = \tau \frac{du_C}{dt}, \quad (2)$$

де $\tau = r \cdot C$ – постійна часу кола, с,

одержимо диференціальне рівняння напруги для кола після комутації

$$\tau \frac{du_C}{dt} + u_C = E. \quad (3)$$

Перехідна напруга на конденсаторі

$$u_C = u_{Cnp} + u_{Cв}. \quad (4)$$

Примусова складова напруги на ємності

$$u_{Cnp} = E. \quad (5)$$

Характеристичне рівняння і корінь рівняння

$$\tau \cdot p + 1 = 0; \quad p = -\frac{1}{\tau}; \quad (6)$$

Знаходимо вільну напругу на ємності

$$u_{C_0} = A e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7)$$

Таким чином, загальне рішення рівняння перехідної напруги на ємності

$$u_C = E + A e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8)$$

Знаходимо постійну інтегрування перехідної напруги на ємності з початкових умов: у момент комутації відповідно до другого закону комутації, напруга на ємності конденсатора дорівнює нулю, тобто при $t = 0$ $u_C(0) = 0$, таким чином, рівняння (8) для цього моменту часу запишеться так

$$0 = E + A, \quad (9)$$

З (9) постійна інтегрування напруги на ємності конденсатора

$$A = -E; \quad (10)$$

Закон зміни перехідної напруги на ємності після комутації

$$u_C = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (11)$$

Покажемо перехідну напругу на ємності на графіку (рисунок 2).

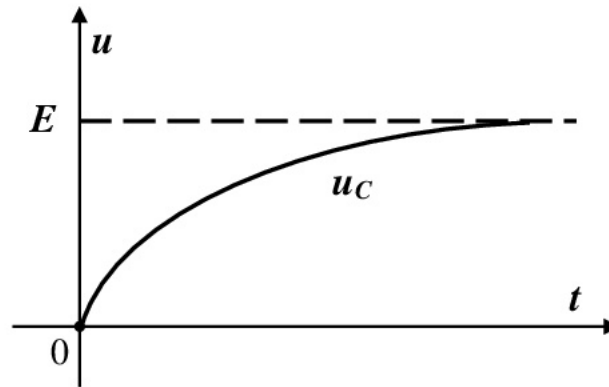


Рисунок 2 – Графік перехідної напруги на ємності при зарядженні конденсатора через резистор в колі з постійною ЕРС

Отримаємо рівняння перехідного струму при зарядженні конденсатора через резистор в колі з постійною ЕРС

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left[E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] = \frac{CE}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (12)$$

З рівняння (12) видно, що в момент комутації струм змінюється стрибком від нуля до значення $\frac{E}{r}$ і потім поступово зменшується.

Рівняння перехідної напруги на активному опорі згідно (12)

$$u_r = ri = Ee^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (13)$$

Так само як і струм, напруга на активному опорі теж змінюється стрибком від нуля до значення E , а потім поступово зменшується.

Розглянемо енергетичний бік процесу заряджання конденсатора. Енергія, що надходить від джерела, накопичується на конденсаторі і витрачається на нагрів резистора

$$\int_0^{\infty} E i dt = \int_0^{\infty} (u_r i + u_C i) dt = \int_0^{\infty} r i^2 dt + \int_0^{\infty} C u_C du_C \quad (14)$$

або

$$E \int_0^{\infty} C du_C = CE^2 = \int_0^{\infty} r i^2 dt + \frac{CE^2}{2}, \quad (15)$$

тобто з (15)

$$\int_0^{\infty} r i^2 dt = \frac{CE^2}{2}. \quad (16)$$

Таким чином, при будь-яких значеннях r і C половина енергії, отриманої від джерела за час перехідного періоду, перейде в теплоту на активному опорі, а друга половина накопичиться в електричному полі конденсатора.

Розглянемо **процес розрядження конденсатора через резистор**. Нехай тепер конденсатор, заряджений до напруги E , у момент комутації замикається на активний опір (рисунок 3). Знайдемо закон зміни напруги на ємності конденсаторі в післякомутаційний період.

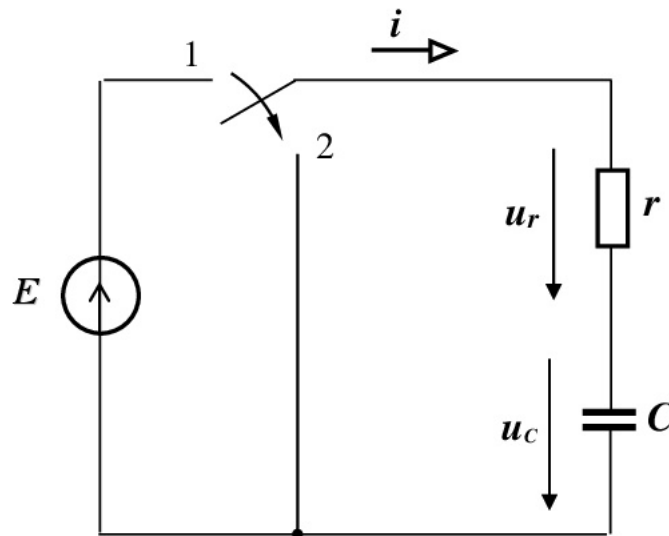


Рисунок 3 – Розрахункова схема перехідного процесу у колі з послідовно з'єднаними активним опором і ідеальним конденсатором при розрядженні конденсатора через резистор в колі з постійною ЕРС

Для післякомутаційного кола справедливі рівняння згідно з другим законом Кірхгофа

$$u_r + u_c = ri + u_c = rC \frac{du_c}{dt} + u_c = \tau \frac{du_c}{dt} + u_c = 0; \quad (17)$$

У даному випадку перехідна напруга на ємності конденсатора не має примусової складової, тобто $u_{cnp} = 0$.

Одержимо характеристичне рівняння і корінь характеристичного рівняння для кола після комутації

$$\tau \cdot p + 1 = 0; \quad p = -\frac{1}{\tau}; \quad (18)$$

Рівняння вільної складової напруги на ємності аналогічно (7).

Знайдемо постійну інтегрування напруги на ємності конденсатора з початкових умов: у момент комутації за другим законом комутації напруга на ємності дорівнює E , тобто при $t = 0$ $u(0) = E$ і тоді постійна інтегрування напруги на ємності

$$E = A, \quad (19)$$

Рівняння перехідної напруги на ємності при розрядженні конденсатора через резистор

$$u_C = E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (20)$$

Графік перехідної напруги на ємності при розрядженні конденсатора через резистор буде наступним (рисунок 4)

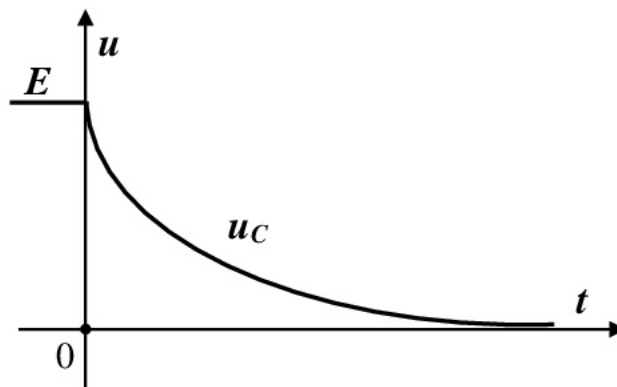


Рисунок 4 – Графік перехідної напруги на ємності при розрядженні конденсатора через резистор

Знайдемо рівняння перехідного струму у колі при розрядженні конденсатора через резистор

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} E e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{CE}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (21)$$

Рівняння напруги на активному опорі

$$u_r = -E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (22)$$

З енергетичної точки зору процес розрядження конденсатора характеризується переходом енергії, накопиченої в електричному полі конденсатора, у теплоту на резисторі

$$\int_0^{\infty} r i^2 dt = \frac{E^2}{r} \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt = -\frac{E^2 \tau}{2r} e^{-\frac{2t}{\tau}} \Big|_0^{\infty} = \frac{CE^2}{2}. \quad (23)$$

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 16 «Перехідні процеси в лінійних колах [1: с.201-203], [2: с.240-241], [3, с.441-449].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 16.3, 16.4 [4].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитися з експериментальною установкою, у якій періодично за допомогою перемикача поляризованого реле, будуть чергуватися процеси заряду і розряду конденсатора через резистори.

- 2 Підключити експериментальну установку до джерела постійної напруги, а поляризоване реле до джерела змінної напруги із частотою 50 Гц .
- 3 Установити зазначені викладачем значення ємності конденсатора, опорів зарядного резистора і розрядного резистора.
- 4 Включити осцилограф і подивитися на екрані криві зміни сили струму і напруги в колі з конденсатором при його зарядженні і розрядженні.
- 5 Виконати експериментальне дослідження, результати занести в таблицю 1.
- 6 Розрахувати фізичні величини, що характеризують коло при зарядженні і розрядженні конденсатора через резистор.
- 7 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Уміти проаналізувати енергетичні процеси в електричному колі при зарядженні і розрядженні конденсатора через резистор.
4. Уміти розрахувати фізичні величини, що характеризують коло при зарядженні і розрядженні конденсатора через резистор за експериментальними даними.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з наступних елементів: постійної напруги $4\text{-}6 \text{ В}$, джерела живлення змінної напруги 30 В , конденсатора C , резистора R_3 в колі зарядження конденсатора і резистора R_P в колі розрядження конденсатора, однополюсного вимикача QS_1 ,

поляризованого реле KV , перемикачів QS_2 , QS_3 , осцилографа, вольтметрів PV_1 , PV_2 , лабораторного автотрансформатора TV .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 5.

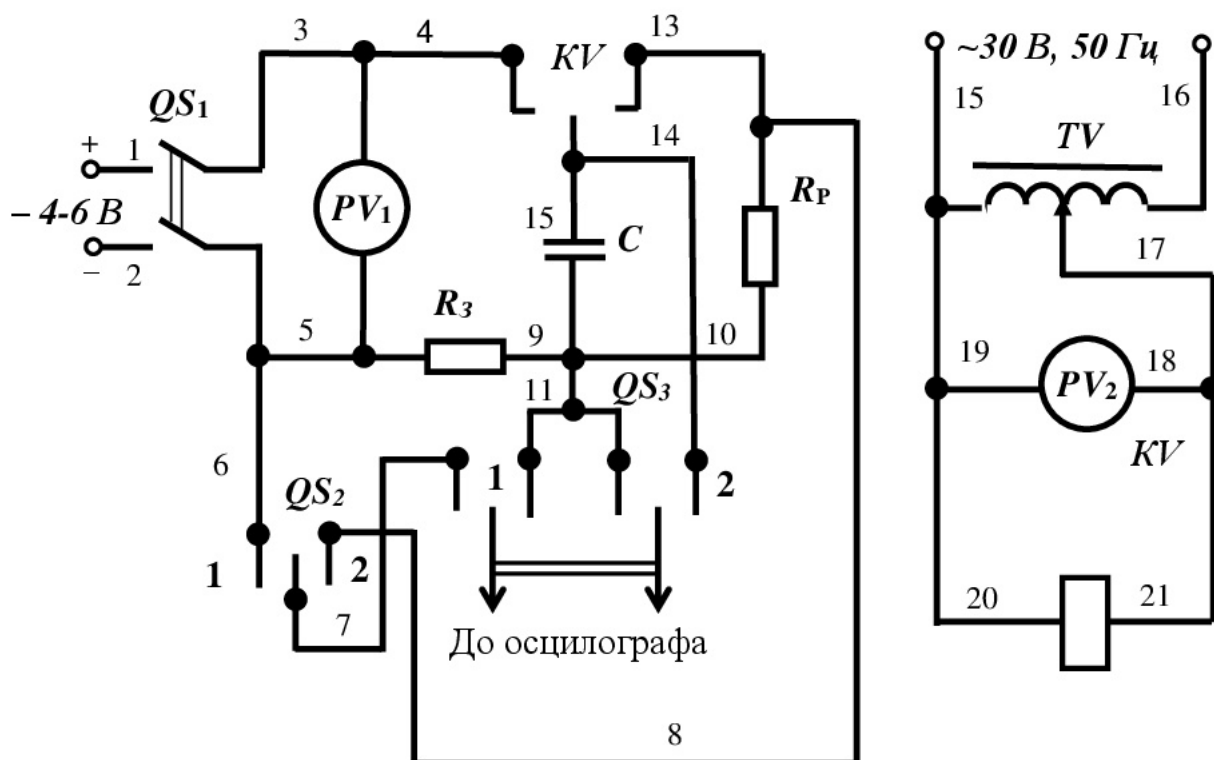


Рисунок 5 - Принципова електрична схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 21 провідник (на схемі позначені номерами 1-21).

Розрахункова схема експериментальної установки

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при включенні вимикача QS_1 , перемикачів QS_2 , QS_3 в положення **1** (зарядження конденсатора) наведена на рисунку 6а і при включенні

перемикачів QS_2 , QS_3 в положення 2 (розрядження конденсатора) наведена на рисунку 6б.

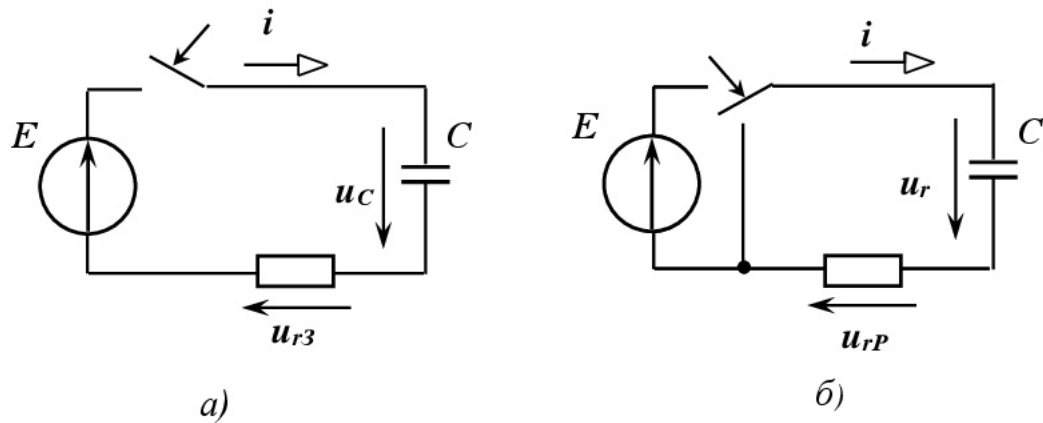


Рисунок 6 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у ньому не протікає.
- активний опір конденсатора дорівнює нескінченності, тобто конденсатор ідеальний.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

E – ЕРС джерела живлення, B ;

r_3 – активний опір резистора в колі зарядження конденсатора, $Ом$;

C – ємність конденсатора, Φ ,

r_P – активний опір резистора в колі розрядження конденсатора, $Ом$;

i – перехідний струм, A ;

u_C – напруга на ємності конденсатора, B ;

u_{r3} – напруга на активному опорі резистора в колі зарядження конденсатора, B ;

u_{rP} – напруга на активному опорі резистора в колі розрядження конденсатора, B ;

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 2 Підключити експериментальну установку до джерела постійної напруги, а поляризоване реле до джерела змінної напруги із частотою 50 Гц .
3. Установити зазначені викладачем значення опорів зарядного резистора.
- 4 Включити осцилограф і подивитися на екрані форми кривих сили струму і напруги при зарядженні і розрядженні конденсатора.
- 5 Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 10.1.

Таблиця 10.1 – Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	$r_3, \text{ Ом}$	$r_P, \text{ Ом}$	PV1, B
Вимикач QS_1 замкнений			

- 6 Запишіть ємність конденсатора C .
- 7 Визначити за допомогою експериментальних даних ЕРС джерела живлення E .
- 8 Визначити постійну часу перехідного процесу τ_3 при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС, використовуючи рівняння

$$\tau_3 = r_3 \cdot C, \quad (24)$$

де τ_3 – постійна часу при заряді конденсатора через резистор, с.

9 Визначити корінь характеристичного рівняння p_3 при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС, використовуючи рівняння

$$p_3 = -\frac{1}{r_3 \cdot C}. \quad (25)$$

10 Визначити примушену напругу на ємності при зарядженні конденсатора через резистор від джерела постійної ЕРС за допомогою експериментальних даних.

11 Визначити постійну інтегрування вільної складової напруги на ємності при зарядженні конденсатора через резистор від джерела постійної ЕРС за допомогою експериментальних даних.

12 Записати рівняння перехідної напруги на ємності $u_C(t)$ при зарядженні конденсатора через резистор від джерела постійної ЕРС.

13 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 12 –Результати розрахунку електричного кола при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС

Фізичні величини, що характеризують коло					
$E,$ B	$\tau_3,$ c	$p_3,$ $1/c$	$u_{C np},$ B	$A,$ B	$u_C(t), B$

14 Визначити постійну часу перехідного процесу τ_p при розрядженні конденсатора через резистор, відключений від джерела постійної ЕРС використовуючи рівняння

$$\tau_p = r_p \cdot C. \quad (26)$$

15 Визначити корінь характеристичного рівняння p_p при розрядженні конденсатора через резистор, використовуючи рівняння

$$p_p = -\frac{1}{r_p \cdot C}. \quad (27)$$

16 Визначити примусову напругу на ємності при розрядженні конденсатора через резистор за допомогою експериментальних даних.

17 Визначити постійну інтегрування вільної складової напруги на ємності при розрядженні конденсатора за допомогою експериментальних даних.

18 Записати рівняння перехідної напруги на ємності $u_c(t)$ при розрядженні конденсатора.

19 Занести отримані значення в таблицю 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку електричного кола при розрядженні конденсатора

Фізичні величини, що характеризують коло					
$E,$ B	$\tau_p,$ c	$p_p,$ $1/c$	$u_{c\ np},$ B	$A,$ B	$u_c(t), B$

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 3 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.
- 4 Таблиця 1.
- 5 Таблиця 2.
- 6 Таблиця 3.
- 7 Висновок щодо параметрів, від яких залежить час перехідного процесу зарядження і розрядження конденсатора через резистор.

Контрольні запитання

- 1 Які фізичні процеси спостерігаються у електричному колі в перехідному режимі при зарядженні конденсатор через резистор?
- 2 Які фізичні процеси спостерігаються у електричному колі в перехідному режимі при розрядженні конденсатор через резистор?
- 3 Складіть розрахункову схему для дослідження перехідного процесу при зарядженні конденсатора через резистор від джерела постійної ЕРС.
- 4 Складіть диференціальне рівняння електричного кола при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС в післякомутаційний період.
- 5 Складіть характеристичне рівняння кола при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС в післякомутаційний період.
- 6 Як визначити корінь характеристичного рівняння при зарядженні конденсатора?
- 7 Як розрахувати постійну часу при зарядженні конденсатора через резистор?
- 8 Як розрахувати примусову складову напруги на ємності при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС?

- 9 Яке рівняння вільної складової напруги на ємності при зарядженні конденсатора через резистор від джерела постійної ЕРС?
- 10 Як знайти початкові умови напруги на ємності, напруги на резисторі і струму в електричному колі при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС?
- 11 Який загальний вигляд має математичне рівняння перехідної напруги на ємності при зарядженні конденсатора через резистор від джерела постійної ЕРС?
- 12 Як визначити постійну інтегрування напруги на ємності при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС з урахуванням початкових умов?
- 13 Який вигляд має математичне рівняння перехідної напруги на ємності при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС?
- 14 Як визначити постійну інтегрування струму у післякомутаційному колі при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС з урахуванням початкових умов?
- 15 Який вигляд має математичне рівняння перехідного струму в колі при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС?
- 16 Складіть розрахункову схему для дослідження перехідного процесу при розрядженні конденсатора.
- 17 Який вигляд має математичне рівняння загального рішення диференціального рівняння при розрядженні конденсатора через резистор?
- 18 Складіть характеристичне рівняння кола при розрядженні конденсатора в післякомутаційний період.
- 19 Як розрахувати постійну часу перехідного процесу при розрядженні конденсатора?
- 20 Як визначити корінь диференціального рівняння при розрядженні конденсатора?

- 8.21 Як розрахувати примушену складову напруги на ємності при розрядженні конденсатора через резистор?
- 22 Який вигляд має рівняння вільної складової напруги на ємності при розрядженні конденсатора через резистор?
- 23 Як знайти початкові умови напруги на ємності при розрядженні конденсатора?
- 24 Як визначити постійну інтегрування напруги на ємності при розрядженні конденсатора, записавши початкові умови при розрядженні конденсатора?
- 25 Який вигляд має рівняння загального рішення перехідної напруги на ємності при розрядженні конденсатора?
- 26 Який вигляд має математичне рівняння перехідного струму в колі при зарядженні конденсатора від джерела постійної ЕРС?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1970. – 592 с.
- 4 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання з теми 16 «Перехідні процеси в лінійних колах» /І.О. Попова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 72 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИМИ КОТУШКОЮ І КОНДЕНСАТОРОМ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при дослідженні перехідних процесів у лінійному електричному колі з послідовно з'єднаними котушкою і конденсатором/

Основні теоретичні відомості

Розглянемо випадок **включення послідовно з'єднаних котушки і конденсатора** при постійній напрузі джерела живлення (рисунок 1).

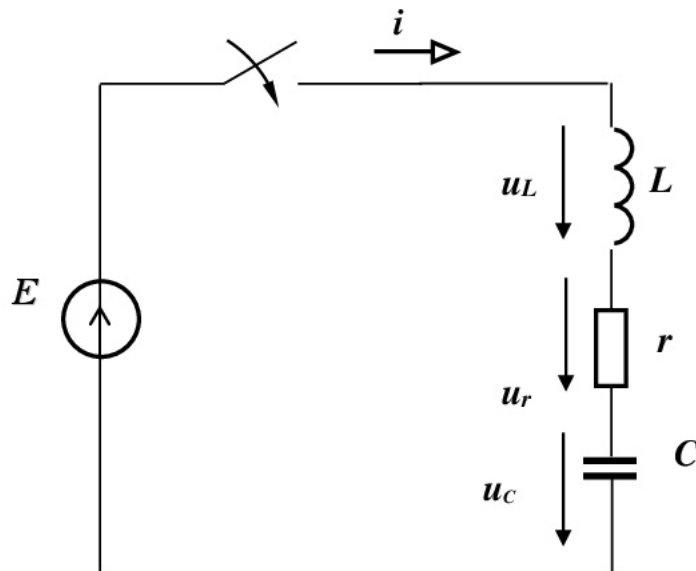


Рисунок 1 – Розрахункова схема включення послідовно з'єднаних котушки і конденсатора на постійну напругу джерела живлення

Для післякомутаційної схеми справедливе рівняння

$$u_L + u_r + u_C = L \frac{di}{dt} + ri + \frac{1}{C} \int i dt = E . \quad (1)$$

Якщо продиференціювати обидві частини рівняння (1), то одержимо диференціальне рівняння другого порядку

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\alpha \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0 \quad (2)$$

де прийняті наступні позначення

$$2\alpha = \frac{r}{L}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (3)$$

Рівняння (3) однорідне, а це значить, що струм у даному колі має тільки вільну складову.

Прийmemo, що $\frac{di}{dt} = P$, з (2) отримаємо характеристичне рівняння:

$$p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2 = 0, \quad (4)$$

Оскільки характеристичне рівняння другого порядку, тоді вільний струм має дві постійні інтегрування A_1 і A_2 , два корені характеристичного рівняння p_1 і p_2

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}. \quad (5)$$

Рівняння вільного струму у загальному вигляді

$$i_{\text{св}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (6)$$

де A_1 і A_2 – постійні інтегрування струму, А;

p_1 і p_2 – корені характеристичного рівняння, 1/с.

Таким чином, характер вільного процесу залежить від параметрів котушки і конденсатора (L , r , C), тобто від коренів характеристичного рівняння і знака дискримінанту, який визначає, будуть корені дійсними ($D > 0$) або комплексними ($D < 0$). Можливі три випадки розвитку перехідного процесу.

Перший випадок. Якщо $\alpha > \omega_0$, $D > 0$, тоді співвідношення параметрів кола

$$\frac{r}{2L} > \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow r > 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (7)$$

тоді корені p_1 і p_2 дійсні, негативні та різні. При цьому загальне рішення рівняння перехідного струму (8) запишеться

$$i = i_{np} + i_{\text{св}} = i_{np} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (8)$$

Примусовий струм $i_{np} = 0$, оскільки в колі постійного струму у примусовому режимі $x_C^{(0)} = 0$.

Постійні інтегрування знаходяться з початкових умов Незалежні початкові умови, згідно законів комутації, у момент комутації при $t = 0$ $i(0) = 0$ і $u_C(0) = 0$. Залежні початкові умови знайдемо з рівняння для кола згідно другого закону Кірхгофа при $t = 0$

$$E = r \cdot i(0) + u_L(0) + u_C(0) \Rightarrow u_L(0) = E \quad (9)$$

Для знаходження постійних інтегрування струму A_1 і A_2 складаємо систему рівнянь: перехідного струму i та першої похідної струму i'

$$\begin{cases} i = 0 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}; \\ i' = p_1 \cdot A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}. \end{cases} \quad (10)$$

Перша похідна з урахуванням початкових умов, оскільки

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot i' \Rightarrow i'(0) = \frac{u_L(0)}{L} = \frac{E}{L}. \quad (11)$$

Система рівнянь (10) з урахуванням початкових умов і першої похідної струму при $t = 0$ має вигляд

$$\begin{cases} 0 = A_1 + A_2 \Rightarrow -A_1 = A_2 \\ \frac{E}{L} = p_1 \cdot A_1 + p_2 A_2 \Rightarrow \frac{E}{L} = p_1 \cdot A_1 - p_2 A_1 = A_1(p_1 - p_2). \end{cases} \quad (12)$$

З (12) маємо

$$A_1 = -A_2 = \frac{E}{L(p_1 - p_2)}. \quad (13)$$

Рівняння перехідного струму

$$i = \frac{E}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (14)$$

Побудуємо графік перехідного струму (рисунок 2).

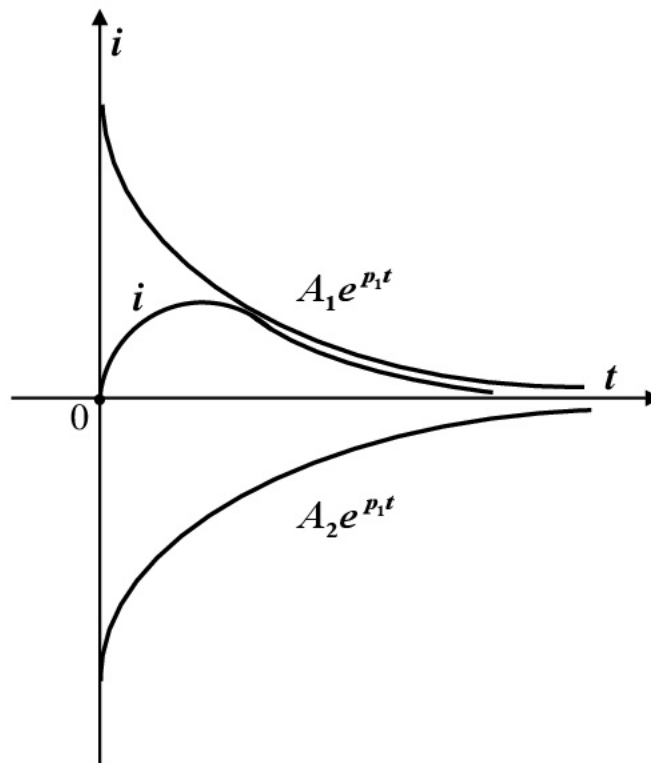


Рисунок 2 – Графік перехідного струму при заряді конденсатора, якщо $D > 0$

З графіку слідує, що перехідний струм в колі не змінює напрям і у колі йде накопичення зарядів на конденсаторі - це **апериодичний процес**.

Другий випадок. Якщо $\alpha < \omega_0$, $r = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, то $D = 0$, корені характеристичного рівняння комплексно-спряжені

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = -\alpha \pm j\omega, \quad (15)$$

де ω – частота вільних затухаючих коливань, рад/с. Визначається як

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}. \quad (16)$$

Загальний вигляд рівняння перехідного струму аналогічний (8).

Постійні інтегрування A_1 і A_2

$$A_1 = -A_2 = \frac{E}{\omega L}, \quad (17)$$

Підставляючи значення коренів, постійних інтегрування у (8), знаходимо рівняння перехідного струму

$$i = \frac{E}{\omega L} e^{(-\alpha + j\omega)t} - \frac{E}{\omega L} e^{(-\alpha - j\omega)t} = \frac{E}{\omega L} e^{-\alpha t} \cdot (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}). \quad (18)$$

або

$$i = \frac{E}{\omega L} e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega t. \quad (19)$$

На рисунку 3 показаний графік перехідного струму в цьому випадку.

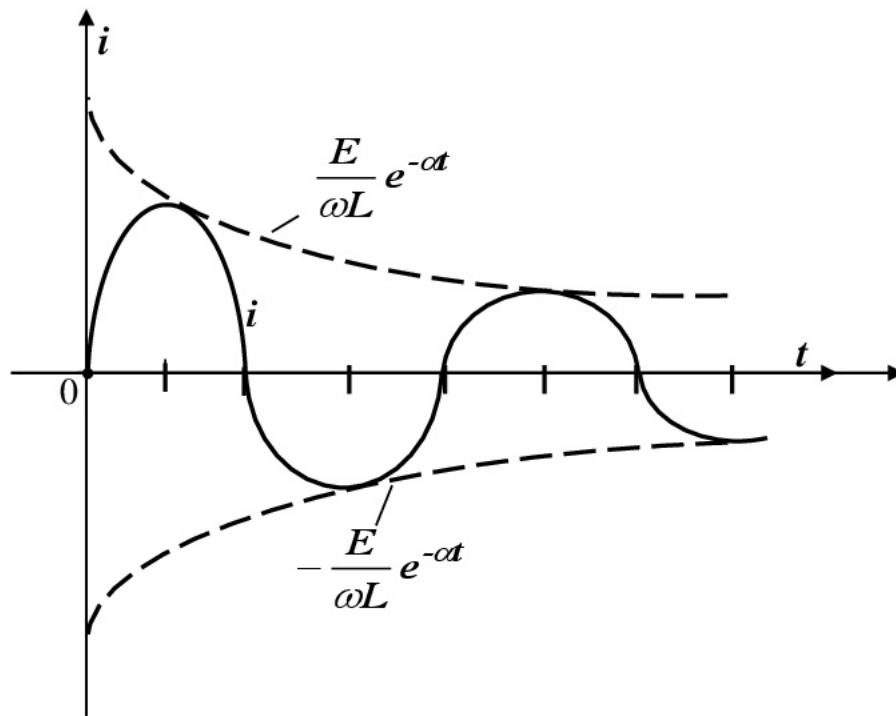


Рисунок 3 – Графік перехідного струму при заряді конденсатора, якщо $D < 0$

З графіку слідує, що перехідний струм в колі змінює напрям впродовж накопичення зарядів на конденсаторі - це **періодичний процес**.

Третій випадок. Якщо $\alpha = \omega_0$, $r = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, то $D = 0$, корені $p_{1,2} = -\alpha$, однакові, дійсні, негативні.

Загальне рішення рівняння (19) у цьому випадку має дріб

$$\frac{\sin \omega t}{\omega} \rightarrow \frac{0}{0}. \quad (20)$$

Виникає математична невизначеність, для розкриття якої по правилу Лопіталя продиференціюємо чисельник і знаменник за ω .

$$\left(\frac{\sin \omega t}{\omega} \right)' \bigg|_{\omega \rightarrow 0} = \frac{t \cdot \cos \omega t}{1} = 0. \quad (20)$$

Рівняння перехідного струму у цьому випадку наступне

$$i = (A_1 + A_2 t) e^{-\alpha t}. \quad (21)$$

Форма кривої струму така ж, як і в першому випадку.

В усіх трьох розглянутих випадках під дією джерела постійної ЕРС відбувається заряджання конденсатора. У першому і третьому випадках зарядний струм не змінює свого напрямку, що характеризує аперіодичний процес. В другому випадку струм являє собою затухаючу синусоїду, що характеризує коливальний процес. Коливання в контурі виникають внаслідок періодичного взаємного перетворення енергії електричного поля, яка накопичується в конденсаторі, та магнітного поля котушки.

Наявність активного опору в колі приводить до затухання коливань внаслідок розсіювання енергії в активному опорі. Характер процесу залежить від коренів характеристичного рівняння, які, у свою чергу, визначаються співвідношенням параметрів елементів кола.

Розглянемо процес **розрядки конденсатора на котушку**. Нехай тепер заряджений до значення E конденсатор у момент часу $t = 0$ підключається до затисків котушки (рисунок 4).

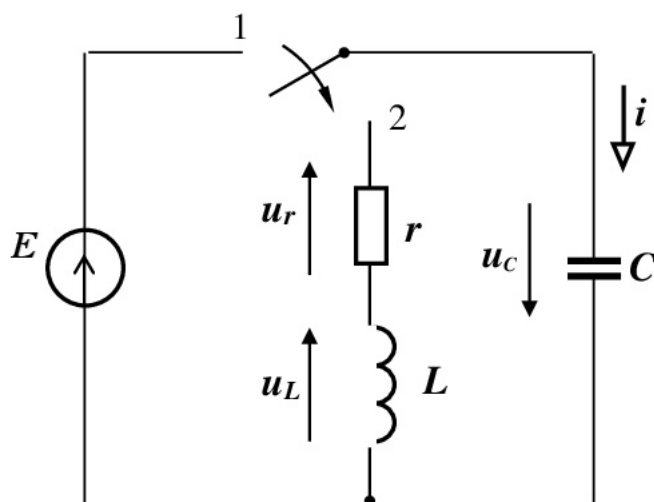


Рисунок 4 – Розрахункова схема послідовно з'єднаних котушки і конденсатора при розряді конденсатора на котушку

Для післякомутаційної схеми справедливе рівняння

$$u_L + u_r + u_c = L \frac{di}{dt} + ri + \frac{1}{C} \int i dt = 0. \quad (22)$$

Характеристичне рівняння (4). В залежності від коренів характеристичного рівняння можливий аперіодичний і періодичний розряд конденсатора на котушку.

Перший випадок. Якщо $\alpha > \omega_0$, $D > 0$, тоді $r > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ тоді корені p_1 і p_2 дійсні, негативні та різні.

Знайдемо рівняння перехідної напруги на ємності u_C і перехідного струму i .

Примусовий струм $i_{np} = 0$. Примусова напруга на ємності $u_{Cnp} = 0$.

Загальне рішення рівняння перехідного струму (8).

У загальному вигляді рівняння перехідної напруги на ємності u_C

$$u_C = 0 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (22)$$

Постійні інтегрування знаходяться з початкових умов. Незалежні початкові умови, згідно законів комутації, у момент комутації при $t = 0$ $i(0) = 0$, оскільки $x_C^{(0)} = 0$, а $u_C(0) = E$.

Для знаходження постійних інтегрування струму A_1 і A_2 складаємо систему рівнянь: перехідної напруги на ємності u_C та першої похідної u_C'

$$\begin{cases} u_C = 0 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}; \\ u_C' = p_1 \cdot A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}. \end{cases} \quad (23)$$

Перша похідна з урахуванням початкових умов, оскільки

$$i = C \cdot \frac{du_C}{dt} = C \cdot u_C' \Rightarrow u_C'(0) = \frac{i(0)}{C} = 0. \quad (24)$$

Якщо підставити початкові умови і першу похідну напруги на ємності у систему рівнянь (23) і розв'язати її, визначимо постійні інтегрування напруги на ємності A_1 і A_2

$$A_1 = \frac{E p_2}{p_2 - p_1}, \quad A_2 = \frac{-E p_1}{p_2 - p_1}. \quad (25)$$

Рівняння перехідної напруги на ємності

$$u_c = \frac{E}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}). \quad (26)$$

Побудуємо графік перехідної напруги на ємності (рисунок 5).

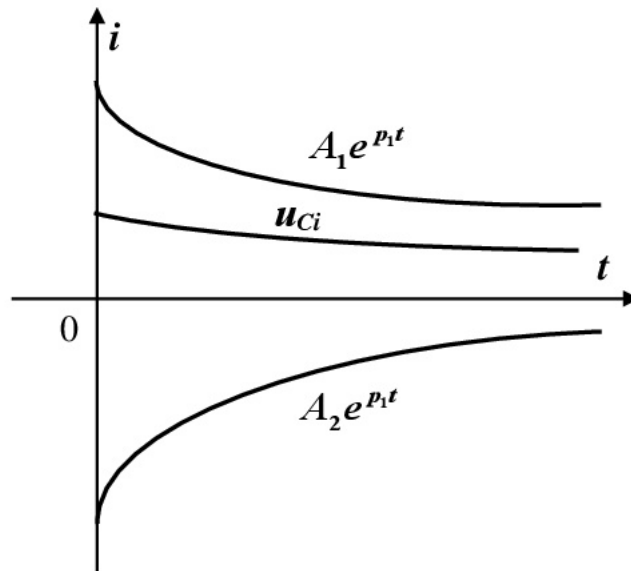


Рисунок 5 – Графік перехідної напруги на ємності при розряді конденсатора, якщо $D > 0$

Рівняння перехідного струму в колі

$$i = \frac{C \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot E}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (27)$$

З графіку слідує, що перехідна напруга на ємності при розряді не перетинає вісь часу - це **апериодичний процес**.

Другий випадок. Якщо $\alpha < \omega_0$, $r = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, то $D = 0$, корені характеристичного рівняння комплексно-спряжені (15).

$$A_1 = -A_2 = \frac{E}{\omega \cdot \sqrt{L \cdot C}} . \quad (28)$$

Рівняння перехідної напруги на ємності

$$u_C = \frac{E\omega_0}{\omega} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos \omega t. \quad (29)$$

На рисунку 6 показаний графік перехідного процесу в цьому випадку.

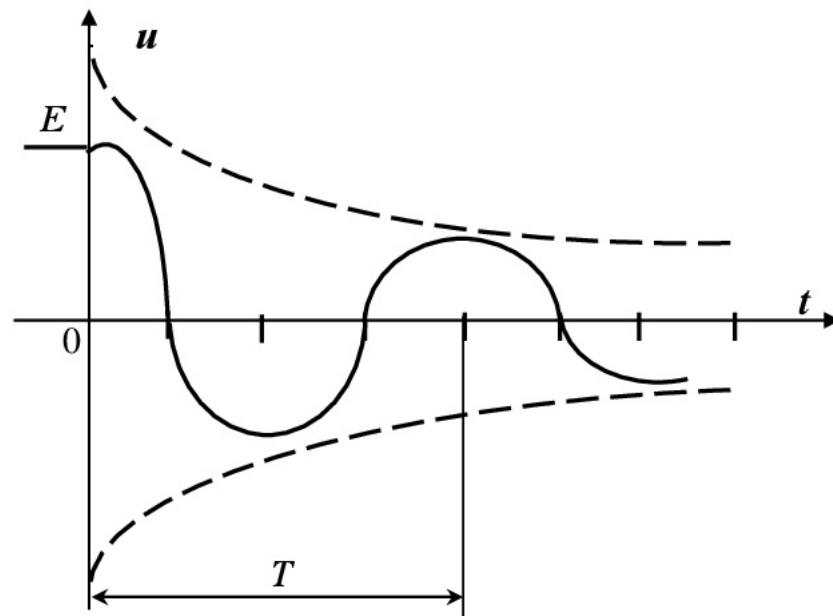


Рисунок 6 – Графік перехідної напруги на ємності при розряді конденсатора, якщо $D < 0$

З графіку слідує, що конденсатор при розрядці обмінюється енергією з котушкою - це **періодичний процес**.

Коливальний процес при розрядці конденсатора на котушку характеризується періодом власних коливань

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}}. \quad (30)$$

Якщо втрати енергії в контурі відсутні ($r = 0$, $\alpha = 0$), то коливання не затухають. При цьому

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (31)$$

Таким чином, *LC-контур*, у якому будь-яким способом компенсуються втрати енергії, може служити генератором незатухаючих гармонічних коливань.

Третій випадок. Якщо $\alpha = \omega_0$, $r = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, то $D = 0$, корені $p_{1,2} = -\alpha$, однакові, дійсні, негативні.

Рівняння перехідної напруги на ємності

$$u_C = E(1 - pt) \cdot e^{-\alpha t} = E(1 + \alpha t) \cdot e^{-\alpha t}. \quad (32)$$

Розряд конденсатора на котушку гранично аперіодичний.

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 16 «Перехідні процеси в лінійних колах [1: с.204-208], [2: с.252-254], [3: с.450-454].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 16.5, 16.6 [4].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитися з експериментальною установкою, у якій періодично за допомогою перемикача, будуть чергуватися процеси заряду конденсатора через резистор і розряду його на індуктивність і резистор.
- 2 Підключити експериментальну установку до джерела постійної напруги, а поляризоване реле до джерела змінної напруги із частотою 50 Гц.
- 3 Установити зазначені викладачем значення ємності конденсатора, опорів зарядного резистора і розрядного резистора для виникнення в електричному колі аперіодичного заряду і розряду конденсатора.
- 4 Включити осцилограф і подивитися на екрані криві зміни сили струму і напруги в колі при аперіодичному заряді і розряді конденсатора.
- 5 Змінити величину опору розрядного резистора для виникнення в електричному колі гранично аперіодичного розряду конденсатора і подивитися на екрані осцилографа форми кривих сили струму й напруги при заряді і розряді конденсатора.
- 6 Змінити величину опору розрядного резистора для виникнення в електричному колі періодичного розряду конденсатора і подивитися на екрані осцилографа форми кривих сили струму й напруги при заряді і розряді конденсатора.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті

виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Уміти визначити значення ЕРС джерела живлення за допомогою експериментальних даних.

- 4 Уміти визначити характер перехідного процесу в після комутаційному колі при підключенні котушки з конденсатором до джерела постійної ЕРС за допомогою експериментальних даних.
- 5 Уміти підібрати величини розрядного резисторів для виникнення в електричному колі аперіодичного розряду конденсатора.
- 6 Уміти підібрати величину розрядного резистора для виникнення в електричному колі гранично аперіодичного розряду конденсатора.
- 7 Уміти підібрати величину розрядного резистора для виникнення в електричному колі періодичного розряду конденсатора.
- 8 Уміти визначити при періодичному характері перехідного процесу за допомогою експериментальних даних: коефіцієнт згасання; період власних коливань; частоту загасаючих коливань розрядного кола; незгасаючих коливань розрядного кола.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з наступних елементів: акумуляторної батареї G , зарядного резистора R_z , за допомогою якого задається процес заряду (аперіодичний, гранично аперіодичний, періодичний), розрядного резистора R_p , за допомогою якого задається процес розряду (аперіодичний, гранично аперіодичний, періодичний), однополюсного вимикача QS_1 , котушки індуктивності K , поляризованого реле KV , яке по чергово включає процес заряду і розряду конденсатора на котушку, двох перемикачів QS_2 , QS_3 , осцилографа і вольтметрів PV_1 (контролює напругу процесу заряду конденсатора через котушку) і PV_2 напругу на котушці поляризованого реле.

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 7.

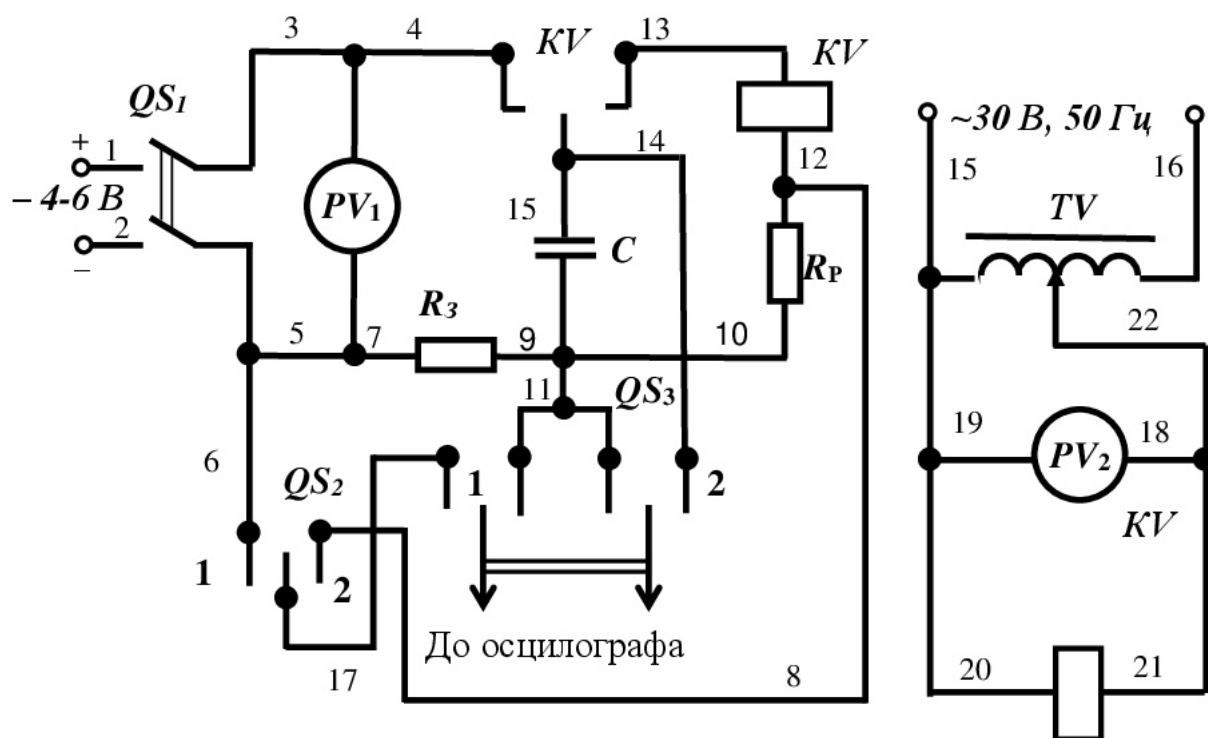


Рисунок 7 - Принципова електрична схема
експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 22 провідника (на схемі позначені номерами 1-22).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у ньому не протікає.
- активний опір конденсатора дорівнює нескінченності, тобто конденсатор ідеальний.

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при включенні перемикачів QS_2 , QS_3 в положення **1** (зарядження конденсатора) наведена на рисунку 8а і при включенні перемикачів QS_2 , QS_3 в положення **2** (розрядження конденсатора) наведена на рисунку 8б.

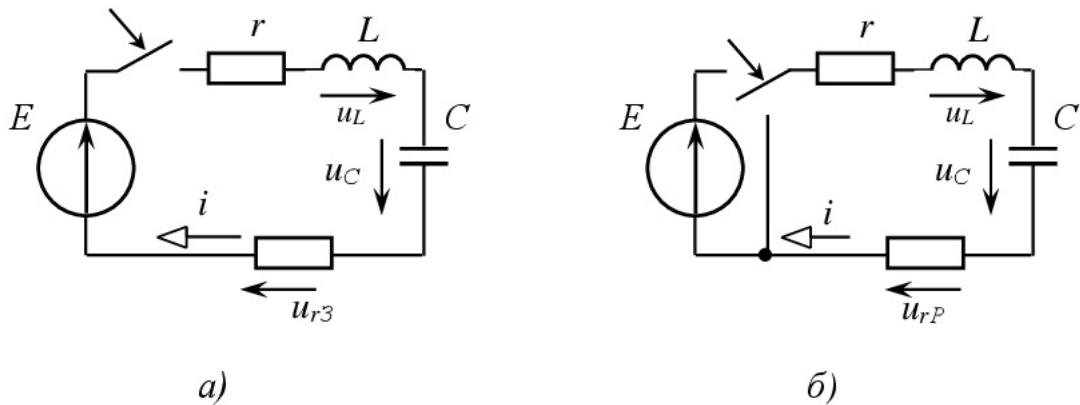


Рисунок 11.2 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

E – ЕРС джерела живлення, B ;

r – активний опір котушки, $Ом$;

L – індуктивність котушки, $Гн$;

C – ємність конденсатора, Φ ,

r_3 – активний опір зарядного резистора в електричному колі, $Ом$;

r_P – активний опір розрядного резистора в колі розрядження конденсатора, $Ом$;

i – перехідний струм, A ;

u_r – напруга на активному опорі котушки, B ;

u_L – напруга на індуктивному опорі котушки, B ;

u_C – напруга на ємності конденсатора, B ;

u_{r3} – напруга на активному опорі зарядного резистора, B ;

u_{rP} – напруга на активному опорі розрядного резистора, В;

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки.
- 2 Підключити експериментальну установку до джерела постійної напруги, а поляризоване реле до джерела змінної напруги 12 В із частотою 50 Гц.
- 3 Установити значення опорів зарядного R_z і розрядного R_P резисторів для виникнення в електричному колі аперіодичного розряду конденсатора.
- 4 Включити осцилограф і подивитися на екрані криві сили струму і напруги в при аперіодичному режимі в електричному колі.
- 5 Установити значення опору розрядного резистора R_P для виникнення в електричному колі гранично аперіодичного розряду конденсатора.
- 6 Включити осцилограф і подивитися на екрані осцилографа криві сили струму і напруги в при гранично аперіодичному режимі в електричному колі.
- 7 Установити значення опору розрядного резистора R_P для виникнення в електричному колі періодичного розряду конденсатора.
- 8 Включити осцилограф і подивитися на екрані осцилографа криві сили струму і напруги на ємності при періодичному режимі перехідного процесу в електричному колі.
- 9 Запишіть параметри котушки: активний опір r_k , індуктивність L_k і ємність конденсатора .
10. Записати показання приладів, результати експериментальних даних занести в таблицю 1.
- 11 Розрахуйте корені характеристичних рівнянь перехідного процесу при періодичному розряді конденсатора. Результати розрахунків занести у таблицю 2.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень при розряді конденсатора на котушку

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	$r_3, \text{Ом}$	$r_B, \text{Ом}$	$U_1, \text{В}$
Аперіодичний характер перехідного процесу			
Гранично аперіодичний характер перехідного процесу			
Періодичний характер перехідного процесу			

12 Розрахуйте незалежні і залежні початкові умови перехідного процесу при періодичному розряді конденсатора. Результати розрахунків занести у таблицю 2.

13 Розрахуйте постійні інтегрування перехідного струму і напруги на ємності перехідного процесу при періодичному розряді конденсатора. Результати занести в таблицю 2.

11 Запишіть рівняння перехідного струму при періодичному розряді конденсатора. Рівняння занести до таблиці 2.

12 Запишіть рівняння перехідної напруги на ємності при періодичному розряді конденсатора. Рівняння занести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків кола при розряді конденсатора на котушку

Режим перехідного процесу	Фізичні величини, що характеризують коло			
	E, B	$p_r, 1/c$	A_i, A	$u_C(t), B$
			A_{uc}, B	$i(t), A$
Аперіодичний				
Гранично аперіодичний				
Періодичний				

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 3 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.
- 4 Таблиця 1.
- 5 Таблиця 2.
- 6 Висновок щодо умов виникнення періодичного, гранично аперіодичного і аперіодичного розряду конденсатора на резистор.

Контрольні запитання

1. Який вигляд має характеристичне рівняння електричного кола з послідовно з'єднаними індуктивною котушкою й конденсатором?
2. Від чого залежить характер перехідного процесу у колі з послідовно з'єднаними індуктивною котушкою й конденсатором?
3. Що називають аперіодичним розрядом конденсатора, зарядженого до певної напруги, через резистор і індуктивну котушку?
4. При якій умові в колі з послідовно з'єднаними індуктивною котушкою й конденсатором виникає аперіодичний розряд конденсатора?
5. Які енергетичні процеси відбуваються в колі з послідовно з'єднаними індуктивною котушкою й конденсатором при аперіодичному розряді конденсатора?
6. Що називають періодичним розрядом конденсатора, зарядженого до певної напруги, через резистор і індуктивну котушку?
7. При якій умові в колі з послідовно з'єднаними індуктивною котушкою й конденсатором виникає періодичний розряд конденсатора?
8. Які енергетичні процеси відбуваються в колі з послідовно з'єднаними індуктивною котушкою й конденсатором при періодичному розряді конденсатора?
9. Як розрахувати критичний активний опір контуру з послідовно з'єднаними індуктивною котушкою й конденсатором при якому виникає гранично аперіодичний розряд конденсатора?
10. За якої умови в колі з послідовно з'єднаними індуктивною котушкою й конденсатором спостерігається граничний випадок аперіодичного розряду конденсатора?
11. Від чого залежить кутова частота власних незатухаючих коливань контуру ω_0 ?

- 12 Як розрахувати величину перехідного струму в момент комутації при розряді конденсатору на активний опір котушки?
- 13 Як розрахувати напругу на ємності конденсатора в момент комутації при розряді конденсатору на активний опір котушки?
- 43 Як визначити кутову частоту власних затухаючих коливань контуру ω при періодичному перехідному процесі?
- 15 Як визначити період затухаючих коливань контуру при періодичному перехідному процесі?
- 16 Як визначити корені характеристичного рівняння при перехідному процесі?
- 17 Як розрахувати коефіцієнт затухання при періодичному перехідному процесі?
- 18 Як визначити кутову частоту незатухаючих коливань контуру ω_0 при періодичному перехідному процесі?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1970. – 592 с.
- 4 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання з теми 16 «Перехідні процеси в лінійних колах» /І.О. Попова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 72 с.

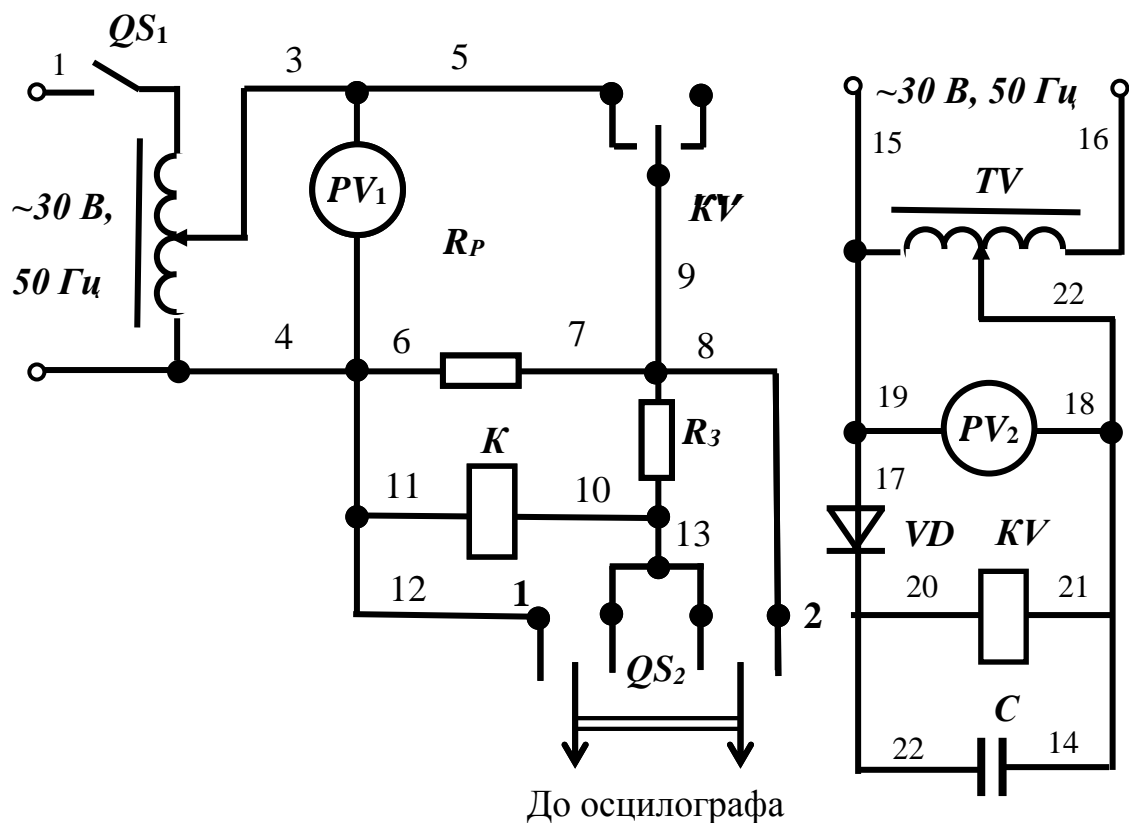


Рисунок 3 – Принципова електрична схема
експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 22 провідники (на схемі позначені номерами 1-22).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у ньому не протікає.

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при включенні перемикача QS_2 в положення **1** - рисунок 4.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕРОЗГАЛУЖЕНОМУ КОЛІ З КОТУШКОЮ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ЇЇ ДО ДЖЕРЕЛА СИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при дослідженні перехідних процесів в котушці у лінійних нерозгалужених колах при підключенні її до джерела синусоїдної напруги.

Основні теоретичні відомості

Нехай котушка індуктивності підключається до джерела гармонійної ЕРС з рівнянням (рисунок 1).

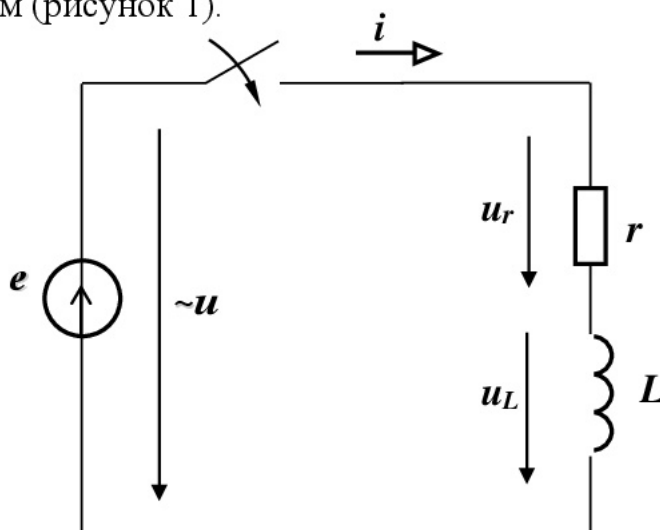


Рисунок 1 – Розрахункова схема підключення котушки
до джерела синусоїдної напруги

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e). \quad (1)$$

Для цього кола в післякомутаційний період справедливі рівняння

$$L \frac{di}{dt} + ri = e \quad (2)$$

або

$$\tau \frac{di}{dt} + i = \frac{E_m}{r} \sin(\omega t + \psi_i), \quad (3)$$

де τ – постійна часу перехідного процесу

$$\tau = \frac{L}{r}. \quad (4)$$

В загальному вигляді рівняння перехідного струму можна записати у вигляді суми вільної і примусової складових

$$i = i_{np} + i_{cs}. \quad (5)$$

Примусовий (сталий) струм у колі

$$i_{np} = I_m \sin(\omega t + \psi_e - \varphi), \quad (6)$$

де I_m – максимальний струм, А. Визначимо як

$$I_m = \frac{E_m}{z}. \quad (7)$$

Повний опір електричного кола в перехідному режимі

$$z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}. \quad (8)$$

Кут зсуву фаз між напругою і струмом кола в перехідному режимі

$$\varphi = \left| \arctg \frac{\omega L}{r} \right|. \quad (9)$$

Вільна складова струму змінюється за експонентою $i_e = A e^{-\frac{t}{\tau}}$.

Рівняння перехідного струму у загальному вигляді з урахуванням примусової складової струму

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_e - \varphi) + A e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (10)$$

Знаходимо постійну інтегрування перехідного струму з початкових умов: $t = 0$ $i(0) = 0$, тому

$$A = -I_m \sin(\psi_e - \varphi). \quad (11)$$

Остаточно одержимо рівняння перехідного струму

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_e - \varphi) - I_m \sin(\psi_e - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (12)$$

Максимально можливого значення струм досягає, якщо в момент включення котушки примусовий струм буде мати амплітудне значення при початковій фазі $\psi_i = \left(\psi_e - \varphi = \frac{\pi}{2} \right)$, а постійна часу кола буде дуже

великою ($r \approx 0$, $\tau \rightarrow \infty$ і $\varphi = \frac{\pi}{2}$), тобто вільний струм буде затухати дуже повільно (рисунок 2).

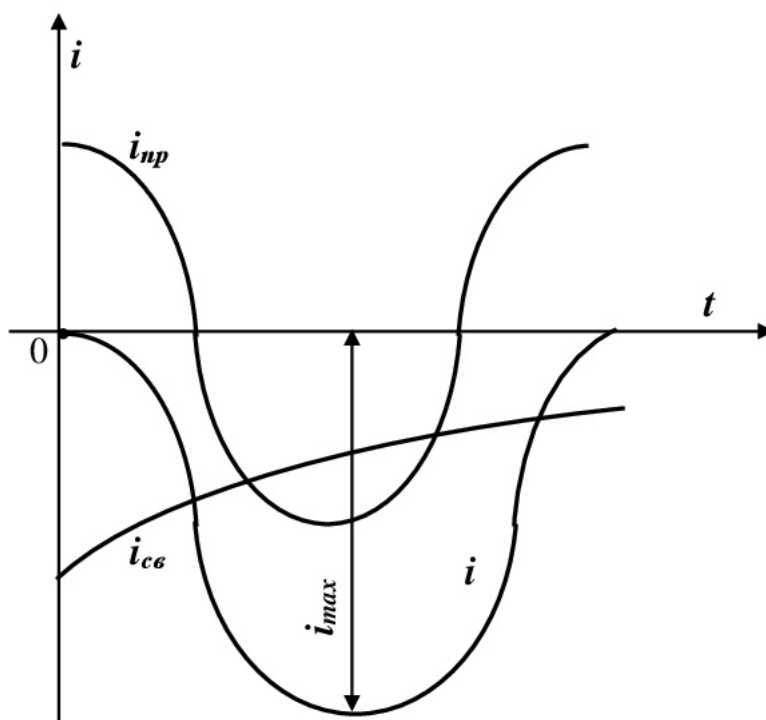


Рисунок 2 – Графіки примусової, вільної і перехідного струму при його початковій фазі $\psi_i = \left(\psi_e - \varphi = \frac{\pi}{2} \right)$

За цих умов $\psi = \varphi$ і прикладена напруга буде проходити через нуль. У цьому випадку амплітуда перехідного струму може досягти подвоєного значення амплітуди примусового (усталеного) струму.

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 16 «Перехідні процеси в лінійних колах [1: с.208-209], [2: с.336-338].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 16.10, 16.11 [3].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитися з з приладами та апаратурою експериментальної установки, у якій періодично за допомогою перемикача, будуть чергуватися процеси підключення котушки до джерела постійної електрорушійної сили і короткого замикання.
- 2 Підключити експериментальну установку до джерела синусоїдної напруги, а поляризоване реле до джерела змінної напруги із частотою 50 Гц.
- 3 Установити зазначені викладачем значення опорів зарядного резистора і розрядного резистора.
- 3 Включити осцилограф і подивитися на екрані криві зміни сили струму і напруги в колі з котушкою при включенні і короткому замиканні на резистор.
- 4 Виконати експериментальне дослідження і результати експерименту занести в таблицю 1.
- 5 Виконати розрахунки і результати розрахунків занести в таблицю 2.
- 6 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті

виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Уміти визначити значення амплітудне і діюче значення ЕРС за допомогою рівняння миттєвого ЕРС з експериментальних даних.
4. Уміти визначити постійну часу перехідного процесу при підключенні котушки до джерела синусоїдного струму за допомогою експериментальних даних.

5. Уміти визначити корінь характеристичного рівняння за допомогою експериментальних даних.
6. Уміти визначити активний опір, індуктивний і повний опір електричного кола при підключенні котушки до джерела синусоїдного струму за допомогою експериментальних даних
- 7 Уміти визначити силу струму при підключенні котушки до джерела синусоїдного струму за допомогою експериментальних даних
- 8 Уміти визначити початкові умови перехідного процесу за допомогою експериментальних даних.
- 9 Уміти визначити примусовий струм за допомогою експериментальних даних.
- 10 Уміти визначити постійну інтегрування струму (вільний струм для $t = 0$) за допомогою експериментальних даних.
- 11 Уміти скласти рівняння перехідного струму зазначеного перехідного процесу електричного кола.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з наступних елементів: джерела живлення змінної напруги 30 В, резистора R_3 в колі вмикання котушки і резистора R_P в колі короткого замикання котушки, однополюсного вимикача QS_1 , котушки індуктивності K , поляризованого реле KV , діоду VD , конденсатору C , перемикача QS_2 , осцилографа PV_1 (контролює напругу процесу підключення котушки) і PV_2 (контролює напругу на котушці поляризованого реле), лабораторного автотрансформатора TV , що регулює напругу на котушці поляризованого реле.

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 3.

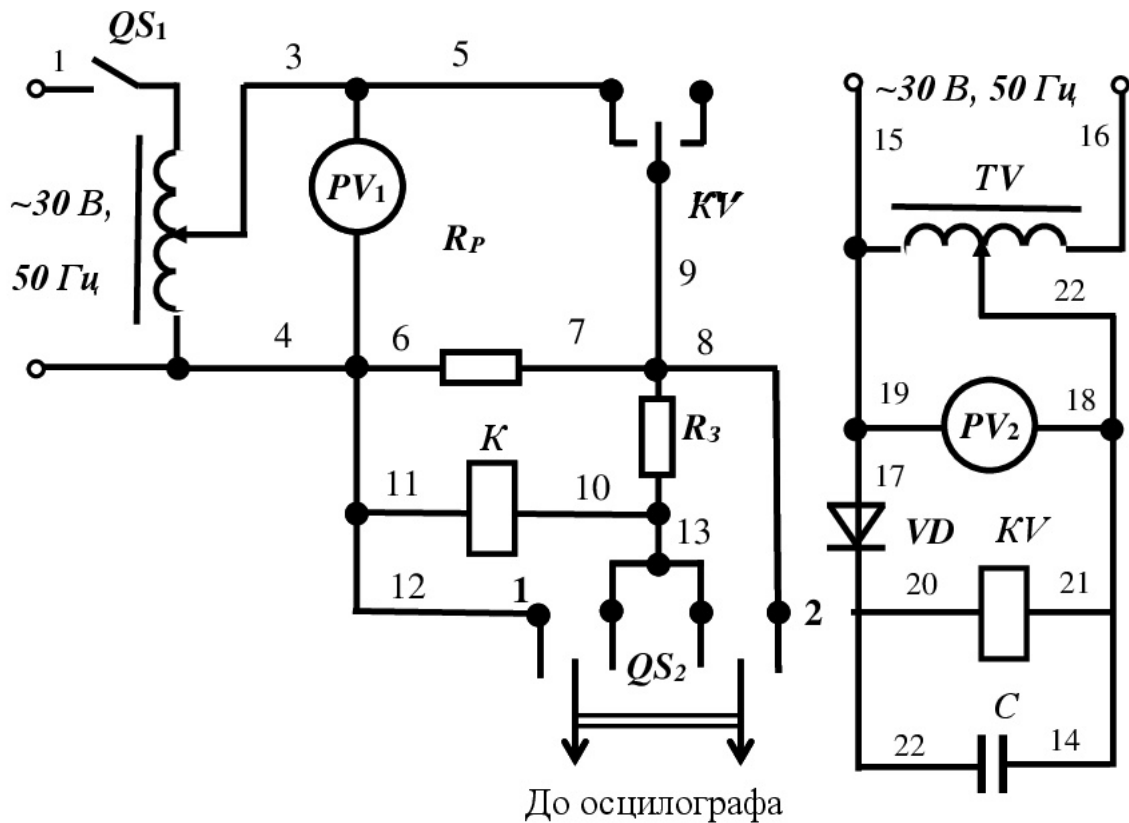


Рисунок 3 – Принципова електрична схема
експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 22 провідники (на схемі позначені номерами 1-22).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у ньому не протікає.

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при включенні перемикача QS_2 в положення **1** - рисунок 4.

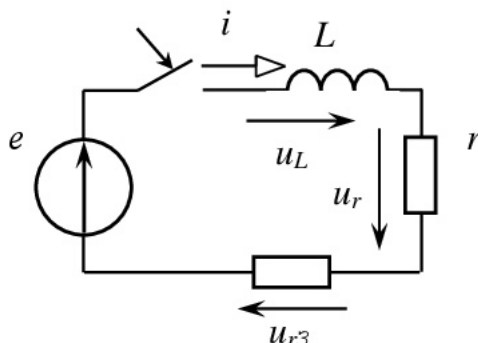


Рисунок 4 - Розрахункова схема експериментальної установки.

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

E – ЕРС джерела живлення, B ;

r – активний опір котушки, $Ом$;

L – індуктивність котушки, $Гн$,

r_3 – активний опір резистора при включенні котушки, $Ом$;

i – перехідний струм, A ;

u_r – напруга на активному опорі котушки, B ;

u_L – напруга на індуктивності котушки, B ;

u_{r3} – напруга на активному опорі резистора при включенні котушки, B ;

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки.
2. Підключити експериментальну установку до джерела змінної напруги із частотою $50 Гц$ напругою $4-6 В$. На поляризованому реле напруга $12 В$.
3. Установити зазначені викладачем значення опорів резисторів R_3 , R_p .
4. Включити осцилограф і подивитися на екрані криві зміни сили струму і напруги в колі з котушкою при включенні.

5. Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1– Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	$r_3, \text{ Ом}$	$r_P, \text{ Ом}$	$U_1, \text{ В}$
Вимикач QSI замкнений			

6. Записати параметри котушки: активний опір r і індуктивність L

7 Записати рівняння миттєвої ЕРС, для заданої викладачем початкової фази ЕРС Ψ_e .

8 Визначити активний опір електричного кола при включенні котушки до джерела живлення, використовуючи опір зарядного резистора r_3 , і активний опір котушки r .

9 Визначити за допомогою експериментальних даних амплітудне значення ЕРС джерела живлення E , використовуючи рівняння:

$$E_m = U_m, \quad (13)$$

10 Визначити постійну часу перехідного процесу τ_B при підключенні котушки до джерела синусоїдної ЕРС, використовуючи рівняння (4).

11 Визначити корінь характеристичного рівняння p_B при підключенні котушки до джерела синусоїдної ЕРС за допомогою експериментальних даних.

12 Визначити примусовий струм i_{np} при підключенні котушки до джерела синусоїдної ЕРС за допомогою експериментальних даних.

13 Визначити постійну інтегрування вільного струму при підключенні котушки до джерела синусоїдної ЕРС за допомогою експериментальних даних і рівняння (11).

114. Записати рівняння перехідного струму $i(t)$ при підключенні котушки до джерела синусоїдної ЕРС, використавши (12).

15 Занести отримані значення в таблицю 2.

Таблиця 2 - Результати розрахунку електричного кола при включенні котушки

Фізичні величини, що характеризують коло при включенні котушки						
$E,$ B	$\tau_B,$ c	$p_B,$ $1/c$	$r_B,$ Om	$i_{np},$ A	$A,$ A	$i(t),$ A

Зміст звіту

1 Назва лабораторної роботи.

2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

3 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.

4 Таблиця 1.

5 Таблиця 2.

6 Висновок щодо можливих негативних наслідках під час перехідних процесів у котушці, що живиться від джерела синусоїдної напруги

Контрольні запитання

1 Складіть розрахункову схему для дослідження перехідного процесу підключення котушки до джерела синусоїдної напруги.

- 2 Складіть диференціальне рівняння електричного кола при включенні котушки до джерела синусоїдної напруги.
- 3 Як розрахувати постійну часу при включенні котушки до джерела синусоїдної напруги?
- 4 Як визначити корінь характеристичного рівняння?
- 5 Як розрахувати примушену складову струму при включенні котушки до джерела синусоїдної напруги?
- 6 Як знайти початкові умови струму в колі при включенні котушки до джерела постійної ЕРС в післякомутаційний період?
- 7 Як визначити постійну інтегрування струму при включенні котушки до джерела синусоїдної напруги, записавши початкові умови?
- 8 Запишіть математичне рівняння перехідного струму при включенні котушки до джерела постійної ЕРС.
- 9 Яку функцію в колі котушки поляризованого реле виконують діод і конденсатор?

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання з теми 16 «Перехідні процеси в лінійних колах» /І.О. Попова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 72 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ З СИНУСОЇДНОЮ ЕРС

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при дослідженні перехідних процесу зарядження конденсатора через резистор в лінійних колах з синусоїдною ЕРС.

Основні теоретичні відомості

Нехай послідовно з'єднані резистор і конденсатор підключаються до джерела синусоїдної ЕРС (рисунок 1), що має рівняння

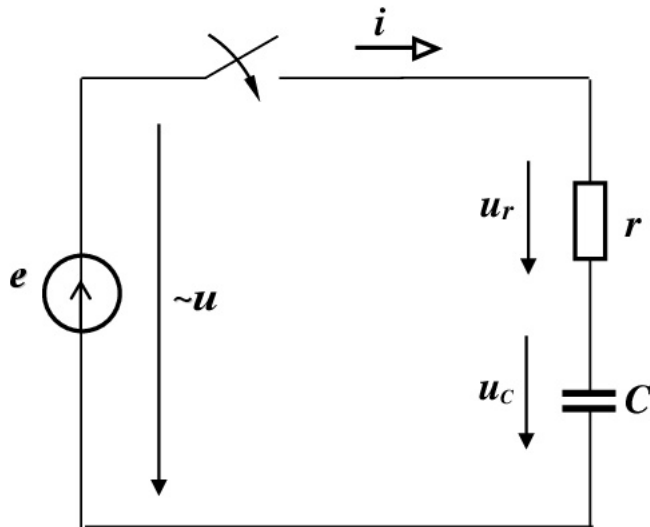


Рисунок 1 – Розрахункова схема послідовно з'єднаних резистора і конденсатор при підключенні до джерела синусоїдної ЕРС

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e). \quad (1)$$

Для цього кола справедливе рівняння за другим законом Кірхгофа

$$ri + \frac{1}{C} \int i dt = e. \quad (2)$$

Струм у колі

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \quad (3)$$

тоді

$$rC \frac{du_C}{dt} + u_C = e \quad (4)$$

або

$$\tau \frac{du_C}{dt} + u_C = e, \quad (5)$$

де $\tau = r \cdot C$ – постійна часу кола, с.

Перехідна напруга на ємності

$$u_C = u_{Cnp} + u_{C\text{св}} \quad (6)$$

Примусова (усталена) напруга на ємності

$$u_{Cm} = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_e + \varphi - 90^\circ), \quad (7)$$

оскільки рівняння примусового струму

$$i_{np} = I_m \sin(\omega t + \psi + \varphi), \quad (8)$$

де амплітудний струм в колі

$$I_m = \frac{E_m}{Z}. \quad (9)$$

Повний опір кола

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (10)$$

Рівняння вільної складової напруги на ємності

$$u_{Cce} = A e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (11)$$

Для перехідної напруги на ємності одержимо рівняння у загальному вигляді

$$u_{Cnn} = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_e + \varphi - 90^\circ) + A e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (12)$$

Знаходимо постійну інтегрування напруги на ємності з початкових умов: $t = 0$ $u_C(0) = 0$, тому постійна інтегрування напруги на ємності

$$A = -U_{Cm} \sin(\psi + \varphi - 90^\circ). \quad (13)$$

Остаточно одержимо рівняння перехідної напруги на ємності

$$u = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi + \varphi - 90^\circ) - U_{Cm} \sin(\psi + \varphi - 90^\circ). \quad (14)$$

Максимально можливого значення напруга на ємності досягає, якщо в момент включення кола примусова складова напруги буде мати амплітудне значення. Це буде мати місце за умови, якщо початкова фаза напруги на ємності $\psi_{uc} = \psi_e + \varphi = \pi$. Крім того, будемо вважати, що постійна часу кола має дуже мале значення, оскільки активний опір конденсатора $r \rightarrow 0$ (рисунок 2).

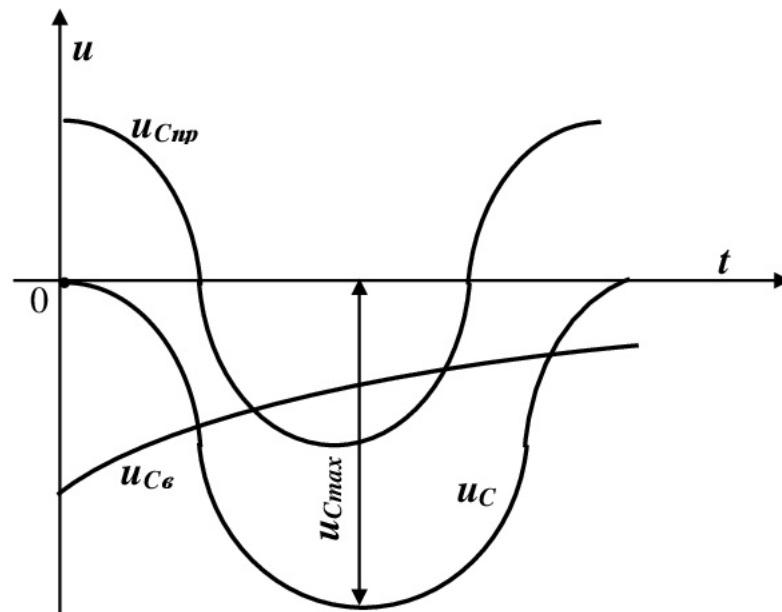


Рисунок 2 – Графік примусової, вільної і перехідної напруги на ємності, якщо початкова фаза напруги на ємності $\psi_{uc} = \psi_e + \varphi = \pi$

У цьому випадку максимальне значення перехідної напруги на ємності може досягати майже подвоєного значення амплітуди примусової складової перехідної напруги на ємності.

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 16 «Перехідні процеси в лінійних колах [1: с.209-210], [2, с.342-343].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 16.12, 16.13 [3].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитися з експериментальною установкою, у якій періодично за допомогою перемикача, будуть чергуватися процеси заряду і розряду конденсатора через резистори.
- 2 Підключити експериментальну установку до джерела синусоїдної напруги 4-6 В із частотою 50 Гц, а поляризоване реле до джерела змінної напруги 12 В.
- 3 Установити зазначені викладачем значення ємності конденсатора, опорів зарядного і розрядного резисторів.
- 4 Включити осцилограф і подивитися на екрані криві зміни сили струму і напруги в колі з конденсатором при його заряді і розряді.
- 5 Виконати експериментальне дослідження і результати занести в таблицю 1.
- 6 Оформити звіт та захистити його.

**Уміння, які здобуваються студентами в результаті
виконання експериментального дослідження**

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Уміти визначити значення амплітудне і діюче значення ЕРС джерела живлення за допомогою експериментальних даних.
4. Уміти визначити постійну часу перехідного процесу при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдного струму за допомогою експериментальних даних.
5. Уміти визначити корінь характеристичного рівняння за допомогою експериментальних даних.
6. Уміти визначити активний опір електричного кола при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдного струму за допомогою експериментальних даних.
- 7 Уміти визначити напругу на ємності при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдного струму за допомогою експериментальних даних
- 8 Уміти визначити початкові умови перехідного процесу за допомогою експериментальних даних.
- 9 Уміти визначити примусову напругу на ємності за допомогою експериментальних даних.
- 10 Уміти визначити постійну інтегрування напруги на ємності (вільну напругу на ємності для $t = 0$) за допомогою експериментальних даних.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з наступних елементів: джерела синусоїдної напруги 30 В, джерела живлення змінної напруги 30 В, конденсатора C , резистора R_3 в колі зарядження конденсатора і

резистора R_P в колі розрядження конденсатора, однополюсного вимикача QS_1 , поляризованого реле KV , діоду VD , конденсатору C , перемикача QS_2 , осцилографа, перемикачів QS_2 , QS_3 осцилографа, вольтметрів PV_1 , PV_2 , лабораторного автотрансформатора TV .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 3.

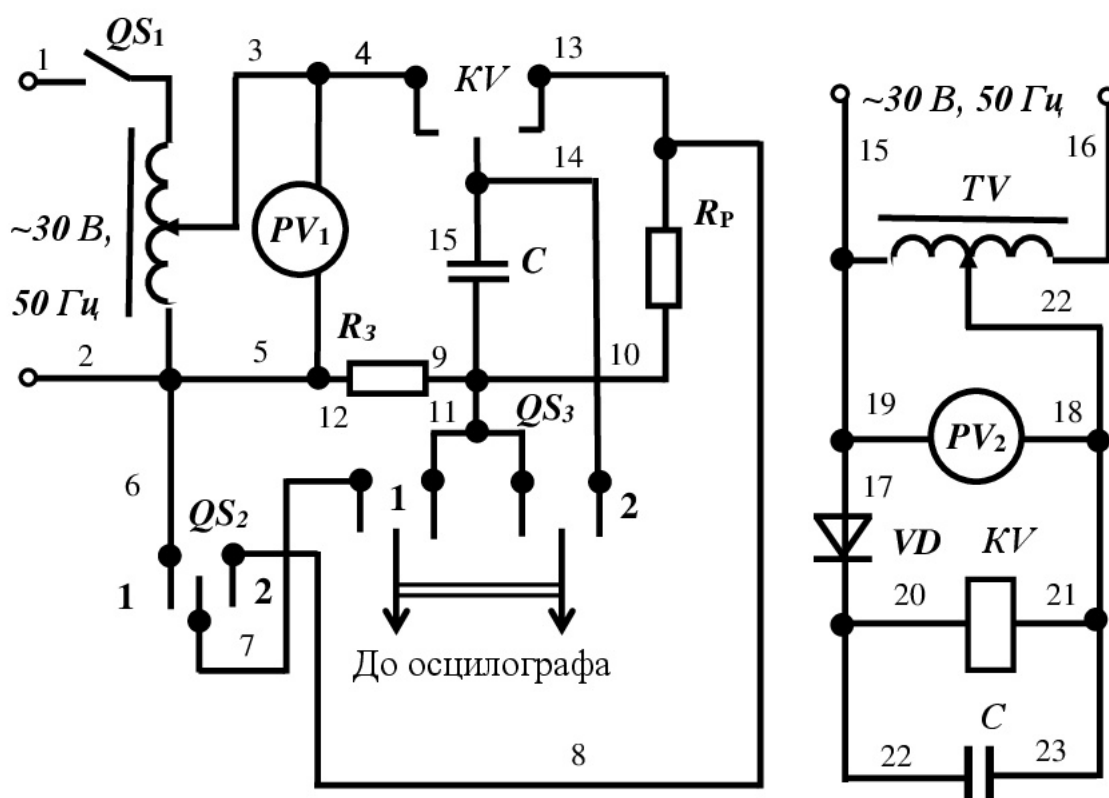


Рисунок 3 – Принципова електрична схема експериментальної установки

Для складання схеми необхідно мати 23 провідники (на схемі позначені номерами 1-23).

Розрахункова схема експериментальної установки

При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- опори з'єднувальних проводів і контактів вимикачів дорівнюють нулю;
- опір обмотки вольтметра дорівнює нескінченності, тобто електричний струм у ньому не протікає.
- активний опір конденсатора дорівнює нескінченності, тобто конденсатор ідеальний.

Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки при включенні перемикачів QS_2 , QS_3 в положення **1** (зарядження конденсатора) наведена на рисунку 4.

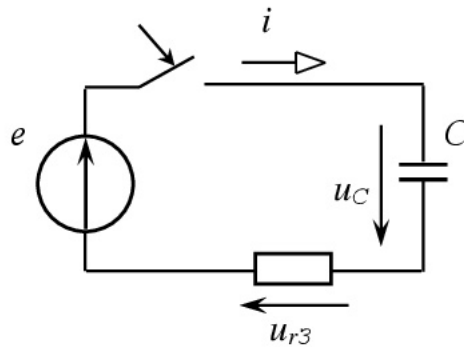


Рисунок 4 - Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

e – ЕРС джерела живлення, B ;

r_3 – активний опір резистора в колі зарядження конденсатора, $Ом$;

C – ємність конденсатора, Φ ,

i – перехідний струм, A ;

u_C – напруга на ємності конденсатора, B ;

u_{r3} – напруга на активному опорі резистора в колі зарядження конденсатора, B ;

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати схему експериментальної установки.
2. Підключити експериментальну установку до джерела змінної напруги 4-6 В із частотою 50 Гц, а поляризоване реле до джерела змінної напруги 12 В.
3. Установити зазначені викладачем значення опорів зарядного і розрядного резисторів.
4. Включити осцилограф і подивитися на екрані форми кривих сили струму і напруги при зарядженні конденсатора.
5. Зняти показання приладів, результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	$r_z, \text{Ом}$	$r_p, \text{Ом}$	$U_l, \text{В}$
Вимикач QS_I замкнений			

6. Запишіть ємність конденсатора C .
- 7 Записати рівняння миттєвої ЕРС, для заданої викладачем початкової фази ЕРС ψ_e .
8. Визначити за допомогою експериментальних даних ЕРС джерела живлення E .
9. Визначити постійну часу перехідного процесу τ_z при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС за експериментальними даними.

- 10 Визначити корінь характеристичного рівняння p_3 при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС.
- 11 Визначити примусову напругу на ємності при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС за рівнянням (7).
- 12 Визначити постійну інтегрування вільної складової напруги на ємності при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС за допомогою рівняння (12).
13. Записати рівняння перехідної напруги на ємності $u_C(t)$ при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС, використавши рівняння (13).
- 14 Занести отримані значення в таблицю 2.
- 15 Побудувати в масштабі графік перехідної напруги на ємності.

Таблиця 2 –Результати розрахунку електричного кола при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС

Фізичні величини, що характеризують коло					
$E,$ B	$\tau_3,$ c	$p_3,$ $1/c$	$u_{Cnp},$ B	$A,$ B	$u_C(t), B$

Зміст звіту

- 1 Назва лабораторної роботи.
- 2 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 3 Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки.
- 4 Таблиця 13.1.
- 5 Таблиця 13.2.
- 6 Графік перехідної напруги на ємності в масштабі.

7 Висновок щодо можливих негативних наслідках перехідних процесів у колі конденсатора, включеного на синусоїдну ЕРС.

Контрольні запитання

- 1 Складіть розрахункову схему для дослідження перехідного процесу зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС.
- 2 Складіть диференціальне рівняння електричного кола при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС в післякомутаційний період.
- 3 Як розрахувати постійну часу при зарядженні конденсатора?
- 4 Як визначити корінь характеристичного рівняння?
- 5 Як розрахувати примусову складову струму при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС?
- 6 Як знайти початкові умови напруги на ємності в колі при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС?
- 7 Як визначити постійну інтегрування напруги на ємності при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС, записавши початкові умови?
- 8 Запишіть рівняння перехідної напруги на ємності при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС.

Список літератури

- 1 Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки. /В.В. Овчаров. - К.: Урожай, 1993. - 224 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.
- 3 Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання

з теми 16 «Перехідні процеси в лінійних колах» Л.О. Попова.
– Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 72 с.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОЇ ОДНОРІДНОЇ ЛІНІЇ БЕЗ ВТРАТ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при визначенні хвильовими процесами в однорідних довгих лініях без втрат у сталих синусоїдних режимах.

Основні теоретичні відомості

Для передачі електричної енергії можливо, як мінімум, два проводи. Розповсюдження електричної енергії вздовж такої лінії має хвильовий характер. Довжина хвилі електромагнітного випромінювання визначається за рівнянням

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

де c – швидкість світла, м/с. Швидкість світла $c = 3 \cdot 10^8$ м/с;

f – частота гармонійного джерела, Гц.

Лінії, геометрична довжина яких сумірна з довжиною хвилі λ , представляються еквівалентними схемами з розподіленими параметрами. Такі лінії називають довгими лініями.

Опір активних втрат r_l , провідність g_l , індуктивність L_l і ємність C розподіляються рівномірно вздовж лінії. Ці параметри називають погонними або **первинними**: $[r] = \text{Ом/м}$, $[L] = \text{Гн/м}$, $[C] = \text{Ф/м}$, $[g] = \text{См/м}$, а довгу лінію вважають однорідною. Лінію, у якій відсутні втрати енергії, називають ідеальною лінією, або лінією без втрат. Для коротких

високочастотних ліній справедливі співвідношення $r_l \ll \omega L_l$ й $g_l \ll \omega C_l$. Тому часто розглядають такі двопровідні та коаксіальні лінії, як лінії без втрат. Лінію без втрат варто розглядати як ідеалізацію дійсної лінії. Така ідеалізація не вносить помітних кількісних похибок і дозволяє більш характерно виявити якісні особливості виникаючих процесів. Швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі вздовж лінії залежить від параметрів самої лінії

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}, \quad (2)$$

і, зазвичай, v менша швидкості світла. Тому реакція і різних точках довгої лінії на вхідний вплив буде спізнюватися. Час запізнення (затримка) τ залежить від довжини лінії l і швидкості розповсюдження

$$\tau = \frac{l}{v} = l \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}. \quad (3)$$

Найбільш простішою у розумінні процесів, що мають місце у довгій лінії, є двопровідна однорідна лінія. Рівняння ідеальної лінії виходять з рівнянь реальної лінії, записаних у комплексній формі з використанням гіперболічних функцій

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_2 ch \gamma \cdot x + i Z_c sh \gamma \cdot x, \\ \dot{I} &= \dot{I}_2 ch \gamma \cdot x + \frac{\dot{U}_2}{Z_c} sh \gamma \cdot x, \end{aligned} \quad (4)$$

де \dot{U} і \dot{I} – комплексні діючі значення напруги і струму на відстані x від кінця лінії;

\dot{U}_2 і \dot{I}_2 – комплексні діючі значення напруги і струму в кінці лінії;

Z_c – хвильовий або характеристичний опір лінії без втрат

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \quad (5)$$

γ – коефіцієнт розповсюдження

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (6)$$

де α – коефіцієнт загасання, Непер. В лінії без втрат $\alpha = 0$;

β – коефіцієнт фази, рад.

Рівняння (4) мають дві складові, кожна з яких представляє собою хвилю, що біжить. Одна хвиля – хвиля, що падає і відбита хвиля.

Якщо опір навантаження в кінці лінії дорівнює хвильовому ($Z_n = Z_c$) відбита хвиля відсутня, і в лінії встановлюється режим хвилі, що біжить, яка подає енергію від джерела до навантаження. При цьому в лінії без втрат потужність джерела буде тільки активною і рівною потужності приймача. Такий режим роботи довгої лінії називають режимом узгодженого навантаження.

Якщо опір навантаження рівний 0 ; ∞ або носить тільки реактивний характер, в лінії виникає режим стоячої хвилі. Передачі енергії від джерела до навантаження не відбувається.

Змішаний режим – коли в лінії є хвилі, що біжать, і стоячі хвилі. Цей режим виникає, коли навантаження носить комплексний характер. У

змішаному режимі передається у навантаження мала частка енергії джерела живлення.

Щоб лінія передавала максимальну потужність до навантаження і одночасно була неспотвореною, потрібно виконати дві умови:

1. Узгодження лінії як збоку навантаження ($Z_n = Z_c$), так і збоку генератора ($Z_e = Z_c$). Це умова повного узгодження лінії, що виключає виникнення відбитих хвиль як від кінця, так і від її початку.

2. Для лінії без втрат ($\alpha = 0$) швидкість розповсюдження хвиль повинна бути постійною

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \text{const.} \quad (7)$$

Ця умова виконується, коли коефіцієнт фази буде лінійно залежати від частоти

$$\beta = \omega \sqrt{L_{l_1} C_1} = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (8)$$

Однорідна лінія характеризується **вторинними параметрами** (Z_c і γ). Для визначення їхніх значень на заданій частоті достатньо виміряти вхідний опір лінії для двох значень опорів навантаження лінії.

На практиці знайшов широке застосування метод виміру параметрів лінії, що отримав назву метода холостого ходу (ХХ) і короткого замикання (КЗ). З рівнянь (4), прийняв $\dot{I}_2 = 0$ (режим ХХ), а потім $\dot{U}_2 = 0$ (режим КЗ), знаходять $Z_{ХХ}$ і $Z_{КЗ}$ лінії:

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= \frac{\dot{U}_0}{I_0} = Z_c \cdot \operatorname{ch} \gamma l, & i_2 &= 0 \\ Z_{xz} &= \frac{\dot{U}_0}{I_0} = Z_c \cdot \operatorname{th} \gamma l, & \dot{U}_2 &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

де \dot{U}_2 , i_2 – комплексні діючі значення напруги і струму на початку лінії (якщо $x = l$);

l – довжина лінії;

γl – стала передачі.

Спільне рішення (9) дозволяє визначити хвильовий опір лінії.

Довгу лінію можливо розглядати як пасивний чотириполіусник з еквівалентною Т-подібною або П-подібною схемою. Тому приблизно можна лінію кінцевої довжини замінити ланцюговою схемою з кінцевим числом Т або П ланок із зосередженими параметрами. Чим більше ланок буде містити ланцюгова схема, тим вище буде точність моделювання.

Можливість моделювання довгих ліній має велике значення при їхньому проектуванні, експериментальному дослідженні у лабораторних умовах процесів у довгих лініях, а також в різних схемах, що поєднуються довгими лініями. Штучні довгі лінії використовуються у електроніці як лінії затримки.

Для розрахунку параметрів моделі довгої лінії приймаємо, що лінія замінена еквівалентною ланцюговою схемою, яка містить n ланок. Кожна ланка такої схеми являє собою П-подібний чотириполіусник – фільтр низьких частот. У розрахунках будемо вважати, що лінія є однорідною і без втрат, а параметри L_0 (Гн/м); C_0 (Ф/м) будемо вважати погонними параметрами (первинними). Визначимо параметри довгої лінії з рівнянь (1-5).

1 Визначимо частоту, при якій електрична довжина лінії, що містить n ланок, буде дорівнювати довжині хвилі генератора, підключеного до входу лінії

$$f_0 = \frac{1}{n\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (10)$$

2 Еквівалентна електрична довжина лінії

$$l_e = \frac{c}{f_0} = cn\sqrt{L_0 C_0} = \lambda. \quad (11)$$

Якщо повітряна лінія мала такі ж первинні параметри, що і модель, на частоті 50 Гц вона повинна мати довжину

$$l_e = \frac{c}{50 \cdot n}.$$

3 Хвильовий опір лінії

$$Z_c = \rho = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (12)$$

4 Коефіцієнт розповсюдження

$$\gamma = j\omega\sqrt{L_0 C_0} = j\beta. \quad (13)$$

5 Час затримки

$$\tau = n\sqrt{L_0 C_0} . \quad (14)$$

б Вхідний опір лінії залежить від режиму роботи лінії:

а) режим холостого ходу ($Z_n = \infty$; $Z_2 = 0$);

б) режим короткого замикання ($Z_n = 0$; $\dot{U}_2 \neq 0$);

в) режим роботи на реактивне навантаження ($Z_n = jX_n$; $\dot{U}_2 \neq 0$; $\dot{I}_2 \neq 0$; $\varphi_2 = \pm \frac{\pi}{2}$);

г) режим роботи на узгоджене навантаження ($Z_n = Z_c = p$; $\dot{U}_2 \neq 0$; $\dot{I}_2 \neq 0$; $\varphi_2 = 0$);

д) режим роботи на неузгоджене навантаження ($Z_n \neq Z_c$; $\dot{U}_2 \neq 0$; $\dot{I}_2 \neq 0$; $\varphi_2 < \pm \frac{\pi}{2}$);

Режими *а*, *б*, *в* є режимами стоячих хвиль у довгій лінії. Передачі енергії від генератора до навантаження відсутнє. При узгодженому навантаженні (режим *г*) в лінії встановлюється режим хвилі, що біжить і в навантаження передається максимальна ємність. Якщо навантаження носить комплексний характер, то в лінії установлюється змішаний режим, при якому в лінії існують і стоячі хвилі і хвилі, що біжать. Передається до навантаження тільки частина енергії генератора.

6.1 Вхідний опір разімкнутої лінії без втрат (режим XX) є реактивним.

$$-Z_{xx} = -jZ_c \cdot \operatorname{ctg} \beta l = jZ_c \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (15)$$

Якщо $\frac{3}{4}\lambda < l < \lambda$, то $Z_{\text{вх}}$ представляє собою індуктивність, а при $\frac{1}{2}\lambda < l < \frac{3}{4}\lambda$ - ємність.

6.2 Вхідний опір короткозамкненої лінії без втрат (режим КЗ) є також

$$Z_{\text{кз}} = jZ_c \cdot \operatorname{tg} \beta l = jZ_c \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (16)$$

Реактивним і в залежності від довжини l може бути індуктивним або ємнісним. Якщо $\frac{3}{4}\lambda < l < \lambda$, то вхідний опір ємнісний, а при умові $\frac{1}{2}\lambda < l < \frac{3}{4}\lambda$ - індуктивність. При $l = \lambda$, лінія може бути представлена послідовним резонансним контуром, а при $l = \frac{3}{4}\lambda$ - паралельним.

6.3 Вхідний опір лінії, що навантажена на індуктивність або ємність. В цьому випадку реактивне навантаження можна представити відрізком лінії довжиною менше $\frac{1}{4}\lambda$. При індуктивному навантаженні $Z_n = jX_L$ відрізком короткозамкненої лінії, довжину l якого можна визначити з співвідношення

$$\omega L = Z_c \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l' \quad (17)$$

Для ємнісного навантаження $Z_n = -jX_C$ вибирають відрізок лінії довжиною l' , розімкнений на кінці

$$\frac{1}{\omega C} = Z_c \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l'. \quad (18)$$

Таким чином, лінія, навантажена на індуктивність або ємність, може бути замінена лінією, замкненою або розімкненою в кінці, еквівалентна довжина якої збільшена на l' . Вхідний опір буде носити реактивний характер.

6.4 Вхідний опір лінії, навантаженої на узгоджене навантаження, буде носити активний характер

$$Z_{\text{вх}} = Z_c = \rho. \quad (19)$$

6.5 Вхідний опір лінії, навантаженої на неузгоджене навантаження носить комплексний характер якщо $\alpha \neq 0$

$$Z_{\text{вх}} = Z_c \frac{Z_{\text{н}} + Z_c \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot l}{Z_{\text{н}} \cdot \operatorname{th} \beta \cdot l + Z_c}. \quad (20)$$

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 17 «Кола з розподіленими параметрами [1: с.344-364], [2: с.327-357].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 17.1-17.4 [3].
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.

- 2 Зібрати схему експериментальної установки.
- 3 Зробити попередній розрахунок моделі довгої лінії: визначити частоту генератора f_0 і вторинні параметри лінії: хвильовий опір Z_c , коефіцієнт розповсюдження γ .
- 4 Зняти покази приборів і занести в таблицю 1.
- 5 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола та зібрати її.
- 2 Уміти скласти розрахункову схему електричного кола та пояснити її.
- 3 Уміти визначити за допомогою даних моделі довгої лінії даних частоту при якій електрична довжина лінії буде дорівнювати довжині хвилі генератора, підключеного до входу лінії.
- 4 Уміти визначити за допомогою розрахункових даних еквівалентну електричну довжину лінії.
- 5 Уміти визначити за допомогою розрахункових даних хвильовий опір лінії, коефіцієнт розповсюдження хвилі в лінії, час затримки лінії.
- 6 Уміти визначити за експериментальними даними вхідний опір лінії при різних навантаженнях, при холостому ході і короткому замиканні лінії.
- 7 Уміти за експериментальними даними побудувати криві розподілення напруги вздовж лінії для всіх видів навантаження.
- 8 Уміти за експериментальними даними визначити вторинні параметри лінії.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з лабораторного стенду: генератора частоти **G**, типу JDS6600-15M (0-10 МГц, 0-10 В),

транзисторного підсилювача A , моделі довгої лінії K_I-K_{12} , двопробного осцилографа PS типу С1-118А, перемикача $SA1$, реостатів R_I і R_{III} .

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

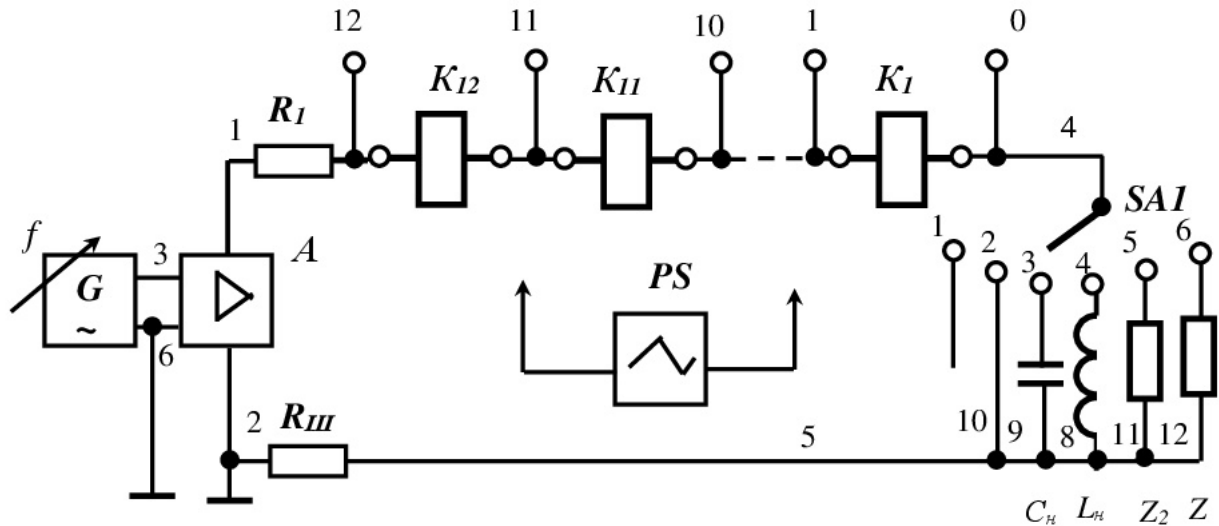


Рисунок 5 - Принципова електрична схема експериментальної установки

Розрахункова схема експериментальної установки

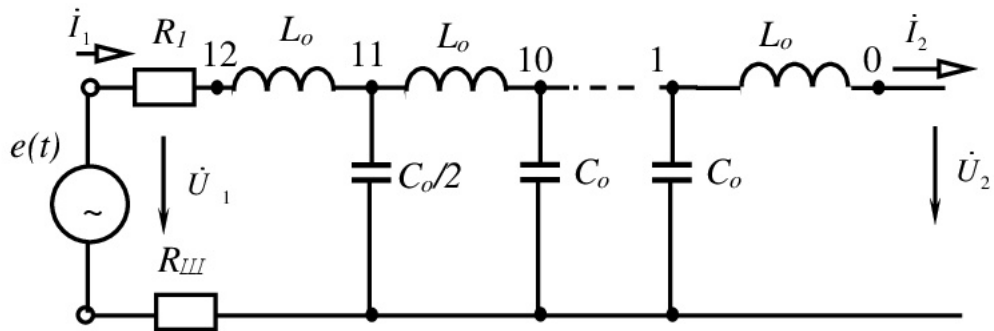
Розрахункові схеми експериментальної установки наведені на рисунку 6. При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- активний опір конденсатора дорівнює нулю; опори з'єднувальних проводів, і контактів перемикача дорівнюють нулю;

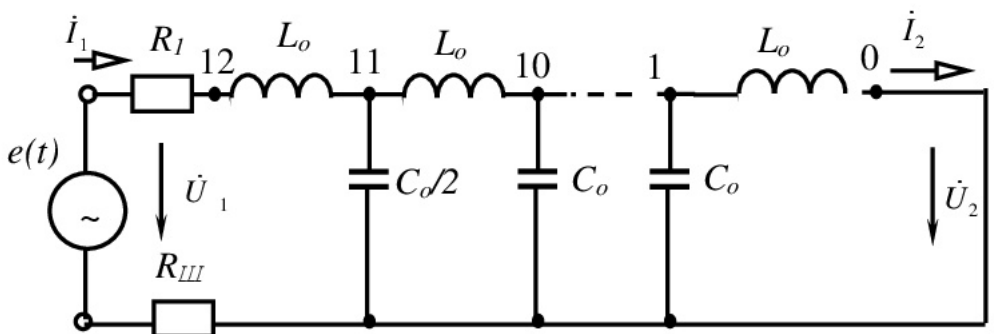
- модель довгої лінії виконана з 12 однакових П-подібних ланок, з'єднаних каскадно; П-подібні ланки виконані з елементів з зосередженими параметрами L_0 , і $\frac{C_0}{2}$.

- для підключення вимірювальних приладів від кожної ланки зроблені відведення, нумерація яких виконана від кінця лінії;

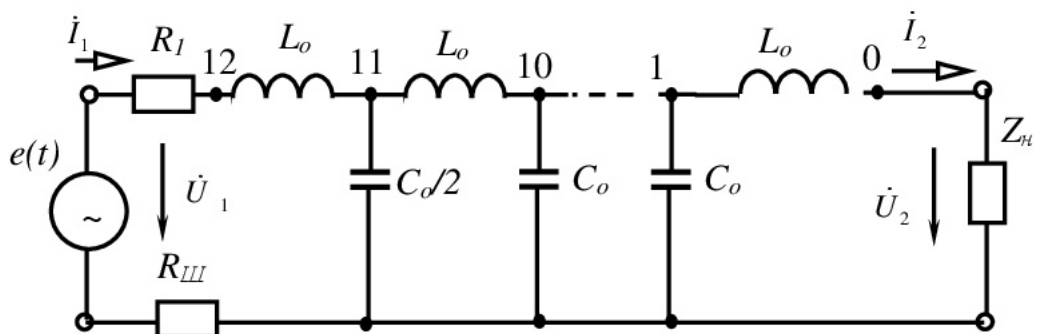
Параметри моделі довгої лінії: $R_I = 1 \text{ кОм}$; $R_{III} = 18 \text{ Ом}$; $L_0 = 6 \text{ мГн}$; $C_0 = 4700 \text{ пФ}$; $Z_2 = 1,1 \text{ e}^{j0} \text{ кОм}$; $Z = 2,2 \text{ e}^{j0} \text{ кОм}$; $C_H = 4700 \text{ пФ}$; $L_H = 6 \text{ мГн}$; число ланок $n = 12$.



а)



б)



в)

а) для ХХ; б) для КЗ; в) для навантажень різного характеру.

Порядок виконання роботи

- 1 Зібрати принципову електричну схему кола.
- 2 Підключити до схеми генератор напруг спеціальної форми.
- 3 Генератор перевести в режим синусоїдної напруги.
- 4 Включити генератор і осцилограф. Встановити визначені значення попереднього розрахунку частоти по частотоміру.
- 5 Підключити канал Y_1 осцилографу до входу лінії (1-2) і встановити амплітудну напругу $U_m = (6-10 \text{ В})$. Підключити канал Y_2 до входу 6, перевести перемикач **SA1** в положення 2 (режим КЗ) і повільно обертаючи ручку "Частота" в обидва боки, знайти положення, при якому напруга буде мінімальна. Знайдена частота і є тією частотою, при якій на лінії укладається одна хвиля. В подальших експериментах ручку "Частота" **не чіпати**.
- 6 Дослідити розподілення напруги у довгій лінії при різних опорах навантаження, заміряючи осцилографом напругу на відводах ланок лінії (0-12), експериментальні дані занести до таблиці 1
- 7 Виміряти вхідний опір лінії в режимі XX (Z_{xx}). Для цього перемикач **SA1** перевести у положення 1, канал Y_2 підключити паралельно R_{III} . Виміряти напругу на вході лінії $U_{m\ xx}$ (канал Y_1) і виміряти напругу на R_{III} , а також фазу (відносно $U_{m\ xx}$). За законом Ома розрахувати струм $I_{m\ xx}$, а потім Z_{xx}

$$Z_{xx} = \frac{\dot{U}_{m\ xx}}{\dot{I}_{m\ xx}}. \quad (21)$$

Треба врахувати, що напругу R_{III} (канал Y_2) повернута на 180° .

8 Виміряти вхідний опір лінії в режимі КЗ ($Z_{КЗ}$). Для цього перемикач **SA1** перевести у положення 2 і повторити виміри згідно пункту 7. За результатами вимірів визначити

$$Z_{КЗ} = \frac{\dot{U}_{mKK}}{\dot{I}_{mKK}}. \quad (22)$$

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень довгої лінії

Номери відводів $\frac{l}{\lambda}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	0	$\frac{1}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{4}{12}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{7}{12}$	$\frac{8}{12}$	$\frac{9}{12}$	$\frac{10}{12}$	$\frac{11}{12}$	$\frac{12}{12}$
XX $Z_H = \infty$; U_m , В													
КЗ $Z_H = 0$; U_m , В													
$Z_H = Z_C$; U_m , В													
$Z_H = j\omega L_0$; U_m , В													
$Z_H = -1/j\omega L_0$; U_m , В													
$Z_H = 2Z_C$; U_m , В													

9 За результатами 6 вимірів побудувати криві розподілення напруги вздовж лінії для всіх видів навантаження.

10 За результатами вимірів пунктів 7 і 8 розрахувати вторинні параметри довгої лінії і порівняти з теоретичними розрахунками.

Зміст звіту

- 1 Найменування лабораторної роботи.
- 2 Мета лабораторної роботи.
- 3 Принципова електрична схема експериментальної установки.
- 4 Розрахункові схеми електричного кола експериментальної установки.
- 5 Графіки розподілення напруги вздовж лінії для всіх видів навантаження.
- 6 Висновок щодо умов створення узгодженої довгої лінії.

Контрольні запитання

- 1 Що розуміють під довгою лінією?
- 2 Які параметри довгої лінії називають первинними?
- 3 Які параметри довгої лінії називають вторинними?
- 4 За яких умов довга лінія вважається лінією без втрат?
- 5 Який фізичний смисл фазової частоти?
- 6 За яких умов в лінії виникають стоячі хвилі?
- 7 За яких умов в лінії виникають хвилі що біжать?
- 8 За яких умов в лінії виникають змішані хвилі?
- 9 Чому при відсутності активного опору і активної провідності довгу лінію називають лінією без втрат?
- 10 Як визначити хвильовий опір довгої лінії?
- 11 Як визначити коефіцієнт розповсюдження хвилі в лінії?
- 12 Як визначити час затримки довгої лінії?

Список літератури

- 1 Зевеке Г.В. Основы теории цепей./Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов: учебник, 5 изд. - М.; Атомэнергоиздат, 1989. – 657 с.

- 2 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1970. – 592 с.
3. Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання з теми 17 «Кола з розподіленими параметрами». / І.О. Попова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 32 с.

Лабораторна робота

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНОГО ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ В ЛИСТАХ, ЩО ПРОВОДЯТЬ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при моделюванні і визначенні електричного потенціалу, ліній напруженості плоскопаралельного електростатичного поля .

Основні теоретичні відомості

Електростатичне поле – поле, створене нерухомими у просторі і незмінними в часі електричними зарядами (при відсутності струмів).

Електростатичне поле характеризується основними величинами: напруженість поля \vec{E} і потенціал φ . Напруженість електростатичного поля – величина векторна, визначається в кожній точці величиною і напрямом. Потенціал є величиною скалярною, значення потенціалу визначається в кожній точці поля деяким числом.

Електростатичне поле визначено, якщо відомий закон зміни напруженості поля або потенціалу у всіх його точках.

Електростатичне поле можна охарактеризувати сукупністю силових і еквіпотенціальних ліній. **Силова лінія** – це подумки проведена в полі лінія, що починається на позитивно зарядженому тілі і закінчується на негативно зарядженому тілі. Дотична до неї влюбій точці співпадає за напрямом з вектором напруженості. **Еквіпотенціальна поверхня** – сукупність точок поля, що мають однаковий потенціал. Проекція

еквіпотенціальної поверхні на січну площину дає **еквіпотенціальну лінію** (лінію рівного потенціалу).

Еквіпотенціальні і силові лінії перетинаються під прямим кутом. Напруженість і потенціал електростатичного поля пов'язані рівнянням

$$\vec{E} = -grad\varphi, \quad (1)$$

Тобто напруженість у будь якій точці дорівнює швидкості зміни потенціалу в цій точці, взятий зі зворотнім знаком.

Рівняння Пуассона і Лапласа є основними диференціальними рівняннями електростатики. Вони є слідством теореми Гауса у диференціальній формі

$$\nabla^2 \cdot \varphi = \frac{\rho_{\text{вільн}}}{\epsilon_a}, \quad (2)$$

де ∇^2 – оператор Лапласа або лапласіан;

φ – потенціал у точці, В;

$\rho_{\text{вільн}}$ – об'ємна щільність вільних зарядів, Кл/м³;

ϵ_a – абсолютна діелектрична проникність речовини, Ф/м.

Вільними називають заряди, які під впливом сил поля можуть вільно переміщуватися у речовині, їх переміщення не обмежується внутрішніми молекулярними силами.

Приватний вид рівняння Пуассона, коли $\rho_{\text{вільн}} = 0$, називають рівнянням Лапласа і записується так

$$\nabla^2 \cdot \varphi = 0, \quad (3)$$

Електростатичне поле в області, де немає вільних зарядів, а також постійне магнітне поле в області, де немає струмів, описується такими ж рівняннями, як і поле постійного струму у середовищі, що проводить поза джерелом енергії, рівнянням Лапласа (3).

Оскільки рівняння Лапласа має єдине рішення при заданих граничних умовах, то при подібних граничних умовах в діелектрику і у середовищі, що проводить розподіл потенціалу буде однаковим в обох середовищах. Ця подібність дозволяє моделювати як електростатичні, так і магнітні поля полем електричного струму у середовищі, що проводить. Дотримання подібних граничних умов зводиться до геометричної подібності областей, в яких досліджується поле.

Плоский лист, що проводить, дозволяє моделювати розподіл електричного потенціалу або магнітних силових ліній в перерізі плоскопаралельного поля, перпендикулярному довгим зарядженим провідникам або провідникам із струмом. Еквіпотенціальні лінії у листі, що проводить, відповідають еквіпотенціальним лініям в електростатичному полі між зарядженими провідниками. При моделюванні магнітного поля еквіпотенціальні лінії в листі, що проводить, відповідають магнітним силовим лініям при протіканні струму в провідниках.

Електричне поле в листі створюється електричним струмом, що розтікається по листу між точками підводу та відводу струму. Оскільки товщина листа незначна і однакова для всього листа, то вже на малій відстані від підводу та відводу струму можна вважати, що лінії струму по всій товщині листа паралельні поверхні листа. Таким чином поле можна вважати плоско паралельним.

На листах експериментальним шляхом можна побудувати лінії однакового потенціалу і лінії струму. Лінії струму співпадають з лініями напруженості електричного струму, оскільки вектори щільності струму ($\vec{\delta}$) і напруженості електричного поля (\vec{E}) пропорційні,

$$\vec{\delta} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (4)$$

де γ – питома щільність струму, 1/Ом·м.

Сукупність ліній рівного потенціалу (еквіпотенціалей) і ліній напруженості поля (силових ліній) створюють картину поля, осередок картини поля показана на рисунку 1.

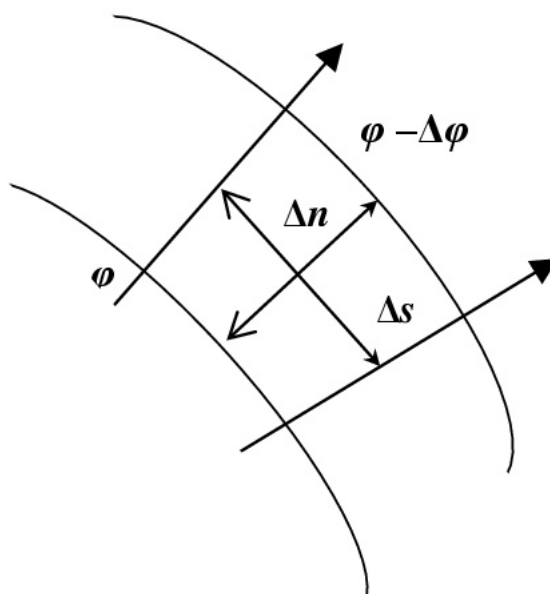


Рисунок 1 – Осередок картини електростатичного поля

При побудові картини плоско паралельного поля слід триматися наступних правил:

1 Різниця потенціалів сусідніх ліній рівного потенціалу повинна бути однаковою $\Delta\varphi = const.$

2. Лінії напруженості поля проводяться перпендикулярно еквіпотенціалам.

3. Відношення середньої довжини до ширини осередку поля зберігаються однаковими.

Якщо картина поля побудована з дотриманням правил, тоді у трубках потоку вектора напруженості поля (у трубках струму), обмежених сусідніми силовими лініями, буде однаковий потік вектора напруженості (струм). В цьому разі по картині поля можна визначити середню напруженість поля в границях осередку поля

$$E_{сер} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta n}, \quad (5)$$

середню щільність струму

$$\delta_{сер} = \gamma \cdot E_{сер}, \quad (6)$$

і опір листа r між точками підвода і відводу струму. Оскільки довжина осередку дорівнює ширині, то опір осередку не залежить від її розмірів

$$r_n = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{\Delta n}{\gamma \cdot \Delta s \cdot d} = \frac{1}{\gamma \cdot d}, \quad (7)$$

де d – товщина листа, м.

Опір листа між точками підводу і відводу струму визначають через опір осередку і підраховували N послідовних осередків між крайніми лініями рівного потенціалу в одній трубці струму і число M паралельних

трубок в листі або визначив за законом Ома, відмірявши струм і напругу між точками підводу і відводу струму.

$$r = r_n \frac{N}{M} = \frac{U}{I}. \quad (8)$$

На основі аналогії між електричним полем і електростатичним полем знаходимо ємність досліджуваної системи різнойменних заряджених тіл, розташованих у повітрі (електрична стала $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м)

$$C = \frac{\varepsilon_0}{\gamma} \cdot \frac{1}{r}. \quad (9)$$

При заданій товщині листа d легко визначити питому провідність γ .

Завдання для самостійної підготовки

- 1 Вивчити теоретичний матеріал за темою 18 «Електромагнітне поле та методи його аналізу» [1: с. 216-239, с. 257-265, с. 292-361], [2: с.190-224].
- 2 Виконати навчально-контролюючі завдання в таблицях 18.1-14.4 [2]
- 3 Відповісти на контрольні запитання.

Програма виконання роботи

- 1 Ознайомитись з приладами та апаратурою, що застосовуються в лабораторній роботі.
- 2 Зібрати схему експериментальної установки дослідження електричного поля на набірній панелі.
- 3 Зняти покази приборів у таблицю 1 і нанести точки на поверхню листа в клітинку, попередньо розлінованого в масштабі планшету.

- 4 Провести розрахунку плоскопаралельного електростатичного поля, результати розрахунку занести у таблицю 2.
- 5 Оформити звіт та захистити його.

Уміння, які здобуваються студентами в результаті виконання експериментального дослідження

- 1 Уміти скласти принципову електричну схему кола і зібрати її на набірній панелі.
- 2 Уміти виміряти за допомогою експериментальних даних електричний потенціал плоскопаралельного електростатичного поля і об'єднати їх у еквіпотенціальні лінії.
- 3 Уміти визначити за допомогою експериментальних даних напруженість плоскопаралельного електростатичного поля.
- 4 Уміти розрахувати середню щільність струму, опір листа r між точками підвода і відводу струму, ємність і питому провідність листа.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з генератора постійної регульованої напруги G (0-15 В), набірної панелі, що складається з штепсельних гнізд і служить для збірки електричних кіл, планшету для моделювання плоскопаралельного електростатичного поля, вимикача QS , амперметра PA (200мА), вольтметра (20 В) і зонду для вимірювання потенціалу.

Принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рисунку 2.

Для складання схеми необхідно мати 7 провідників (на схемі позначені номерами 1-7).

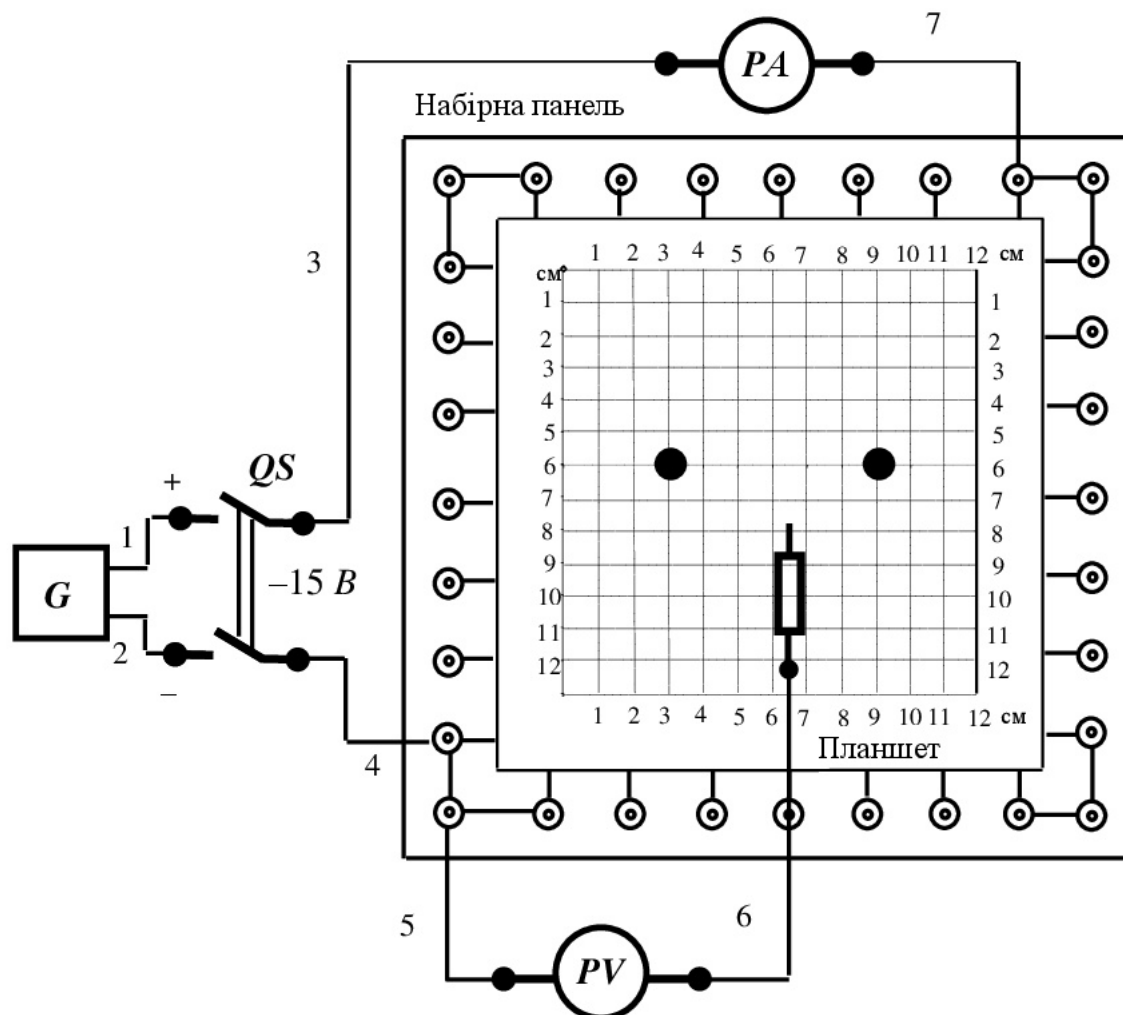


Рисунок 2 - Принципова електрична схема експериментальної установки

Порядок виконання роботи

- 1 Встановити на набірну панель планшет листа, що проводить і зібрати принципову електричну схему електричного кола.
- 2 Приготувати рисунок (на розлінованому папері) розміщення електродів з координатною сіткою, що відповідає рисунку планшета.

3 Включити вимикач **QS**, подати напругу на затиски експериментальної установки.

4 Встановити задану викладачем напругу генератора, виміряти силу струму. і розрахувати шаг виміру зміни потенціалу за рівнянням (10) так, щоб на картині поля було 5 екіпотенціальних ліній

$$\varphi = \frac{U}{6}. \quad (10)$$

5 Переміщуючи зонд від точки нульового потенціалу по вісі симетрії до другого електроду, знайти точки з потенціалами φ , $2\Delta\varphi$, $3\Delta\varphi$, $4\Delta\varphi$, $5\Delta\varphi$. Знайдені точки відмітити на приготовленому рисунку з координатною сіткою.

6 Переміщуючи зонд з точки з потенціалом φ навкруги електроду (злегка наближаючи або віддаляючи від нього), знайти точки рівного потенціалу і відмітити їх на рисунку. Точки рівного потенціалу з'єднати плавною кривою. Аналогічно побудувати інші екіпотенціальні лінії.

7 Побудувати силові лінії напруженості поля. По картині поля визначити число осередків у трубці N і число трубок M , занести результати до таблиці 1.

8 Визначити опір між точками підводу і відводу струму за законом Ома, занести результати до таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних даних поля

Умови проведення експерименту	U	I	φ	r	N	M
	B	A	B	Om	—	—
Вимикач QS замкнений						

9 Визначити за експериментальними даними опір осередку у трубці струму. Результат занести у таблицю 2.

10 Розрахувати питому провідність матеріалу листа між точками підводу і відводу струму при товщині листа 0,02 мм за формулою (8). Результат занести у таблицю 2.

11 Розрахувати середню напруженість електричного поля (5) в одному осередку поля, середню щільність струму, ємність (9) досліджуваного кола. Результати занести у таблицю 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків досліджуваного кола

$r_n, \text{ Ом}$	$\gamma, \text{ I/Ом}\cdot\text{м}$	$E_{\text{сер}}, \text{ В}$	$\delta_{\text{сер}}, \text{ А/м}^2$	$C, \text{ Ф}$

12 Проаналізувати отримані результати і сформулювати висновок.

Зміст звіту

1 Назва теми експериментального дослідження.

2 Принципова електрична схема експериментальної установки.

3.Рисунок з координатною сіткою еквіпотенціальних ліній і силових ліній.

4 Таблиця 1.

5 Таблиця 2.

6 Висновок щодо умов створення електростатичного поля.

Контрольні запитання

1 Чим створюється електростатичне поле?

2 Яке рівняння лінії рівного потенціалу?

3 Якими величинами характеризується електростатичне поле?

4 Що є силовою характеристикою електричного поля?

- 5 Що розуміється під напруженості електричного поля в даній точці?
- 6 Яку поверхню або лінію в електричному полі називають еквіпотенціальною?
- 8 Під яким кутом перетинаються еквіпотенціальні і силові лінії в електростатичному полі?
- 9 Яким рівнянням зв'язані напруженість і потенціал електростатичного поля?
- 10 Що розуміють під вільним зарядом (зарядом тіла?)
- 11 Чому електростатичне поле у листі що проводить називають плоскопаралельним?
- 12 Як визначити щільність струму через напруженість поля і питому провідність середовища?
- 13 Як визначається середня напруженість в осередку електростатичного поля?
- 14 Як визначити опір листа, що проводить, між точками підводу і відводу струму?
- 15 Що таке електрична постійна? Чому дорівнює електрична постійна?

Список літератури

- 1 Атабеков Г. И Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. Ч. 2, 3. / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1979. – 432 с.
2. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. Т.2. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчан. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. Попова І.О. Робочі зошити для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина 3 для студентів 3 курсу енергетичного факультету ОКР «Бакалавр», денної форми навчання

з теми 18 «Електромагнітне поле та методи його аналізу» / І.О. Попова.
– Мелітополь: ТДАТУ, 2016 – 22 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Тестові завдання для самоаналізу до лабораторної роботи
**«Дослідження динамічного і статичного опору елементів нелінійних
кіл постійного струму»**

1. Які елементи електричного кола називаються нелінійними?

- 1 параметри яких змінюються при зміні струму або напруги
- 2 параметри яких не змінюються при зміні струму або напруги
- 3 струм яких остається не змінним при зміні потужності
- 4 потужність яких змінюється при незмінних струмі і напрузі

2 Який вигляд мають вольт-амперні характеристики лінійних елементів?

- 1 прямої лінії
- 2 кривої лінії,
- 3 гіперболи;
- 4 параболи.

3. За якою формулою розраховується динамічний опір у робочій точці вольт-амперної характеристики нелінійного елементу?

1 $R_{\delta} = \frac{dU}{dI} = m_r \cdot \operatorname{tg} \alpha$

2 $R_{\delta} = \frac{U}{I} m_r \cdot \operatorname{tg} \beta$

3 $R_{\delta} = U \cdot I^2$

4 $R_{\delta} = \frac{P}{U}$

4. За якою формулою розраховується статичний опір у робочій точці вольт-амперної характеристики нелінійного елементу?

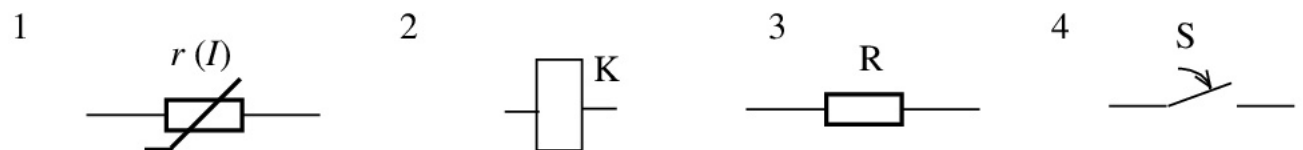
1 $R_c = \frac{dU}{dI} = m_r \cdot \operatorname{tg} \alpha$

2 $R_c = \frac{U}{I} m_r \cdot \operatorname{tg} \beta$

3 $R_c = U \cdot I^2$

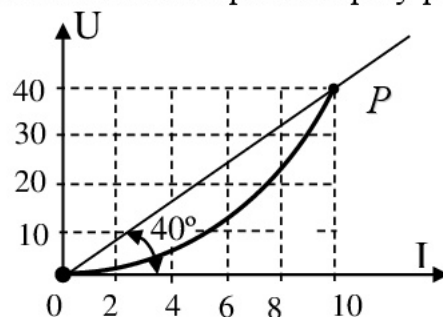
4 $R_c = \frac{P}{U}$

5. Як зобразити на розрахунковій схемі ділянку кола з нелінійним резистором?



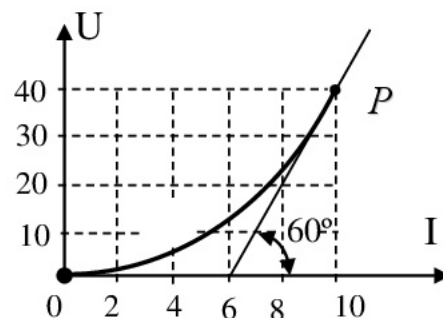
6. Чому дорівнює статичний опір в омах нелінійного резистора у робочій точці P , якщо $\operatorname{tg} 40^\circ = 0,8$; $m_r = 5$ Ом?

- 1 30
2 4
3 25
4 45



7. Розрахувати динамічний опір в омах нелінійного резистора у робочій точці P , якщо $\operatorname{tg} 60^\circ = 1,73$; $m_r = 5$ Ом.

- 1 8,65
2 5
3 25
4 45



Тестові завдання для самоаналізу до лабораторної роботи

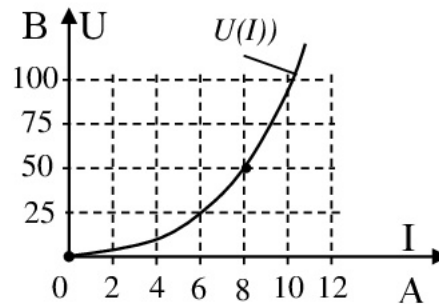
«Дослідження нелінійних кіл постійного струму»

1 Чому дорівнює сила струму в амперах у нелінійному резисторі, якщо напруга на нелінійному резисторі **30 В**, статичний опір **15 Ом**.

- 1 48 2 20 3 2 4 5

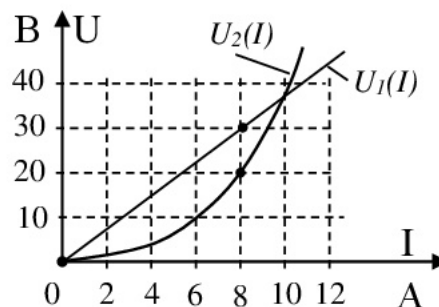
2. Визначити потужність у ватах, що споживає нелінійний резистор, для заданої робочої точки Р вольт-амперної характеристики, якщо напруга на нелінійному резисторі 50 В.

- 1 400
2 56
3 200
4 10



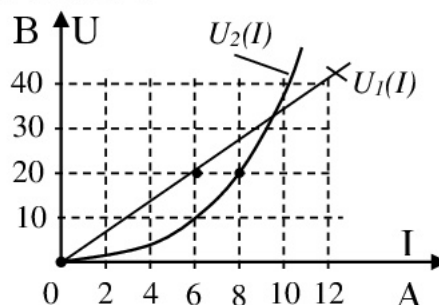
3. При **послідовному** з'єднанні лінійного і нелінійного елементів струм на нелінійному елементі $U_2(I)$ дорівнює **8 А**, визначити напругу у вольтах на лінійному елементі $U_1(I)$

- 1 10
2 30
3 2
4 150



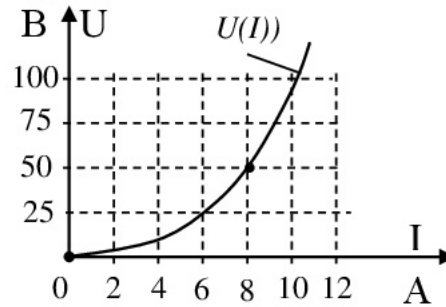
4. Визначити струм в амперах на лінійному елементі $U_1(I)$ При **паралельному** з'єднанні лінійного і нелінійного елементів, якщо напруга на нелінійному елементі $U_2(I)$ дорівнює **20 В**.

- 1 6 2 30
3 12 4 15



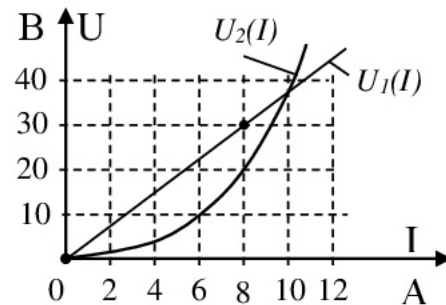
5. Визначити потужність, що споживає нелінійний резистор, якщо опір на нелінійному резисторі **50 Ом**, а сила струму **2 А**.

- 1 400
- 2 56
- 3 200
- 4 10



6. Визначити силу струмів амперах в електричному колі при **послідовному** з'єднанні лінійного і нелінійного елементів, якщо струм на лінійному елементі дорівнює **8 А**.

- 1 15
- 2 2
- 3 8
- 4 10



7. Визначити силу струму джерела в амперах, якщо потужність, що споживає нелінійний резистор, складає **270 Вт**, динамічний опір **30 Ом**.

- | | | | |
|-----|------|------|------|
| 1 3 | 2 30 | 3 12 | 4 10 |
|-----|------|------|------|

8. При **послідовному** з'єднанні двох нелінійних елементів визначити струм в амперах на другому нелінійному елементі, якщо струм на першому нелінійному елементі дорівнює **8 А**,

- | | | | |
|-----|------|-----|------|
| 1 9 | 2 30 | 3 8 | 4 5. |
|-----|------|-----|------|

9. При **паралельному** з'єднанні лінійного і нелінійного елементів визначити напругу у вольтах на лінійному елементі, якщо напруга на нелінійному елементі дорівнює **20 В**.

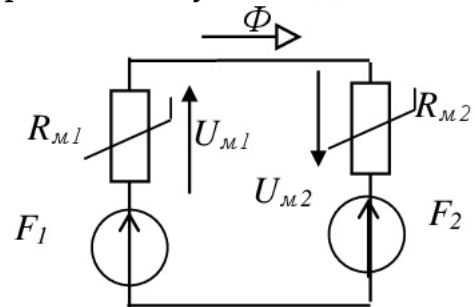
- | | | | |
|------|------|------|--------|
| 1 10 | 2 20 | 3 12 | 4 150. |
|------|------|------|--------|

Тестові завдання для самоаналізу до лабораторної роботи

«Дослідження нерозгалужених магнітних кіл при постійних магнітних потоках»

1. Запишіть рівняння за 2-й законом Кірхгофа для наведеного магнітного кола, якщо обходити його за годинниковою стрілкою. Рисунок надається.

- 1 $F_1 = R_{m1} \cdot U_{m1} + R_{m2} \cdot U_{m2}$;
- 2 $F_1 = R_{m1} \cdot U_{m1} * R_{m2} \cdot U_{m2}$;
- 3 $F_1 - F_2 = R_{m1} \cdot \Phi + R_{m2} \cdot \Phi$;
- 4 $F_1 = R_{m1} \cdot U_{m1} / R_{m2} \cdot U_{m2}$



2. Визначте магнітний потік у веберах, якщо для магнітного кола відомо, що магнітний опір $R_m = 10 \text{ 1/Гн}$, магнітна напруга $U_m = 80 \text{ А}$.

- | | | | |
|-----|-----|------|------|
| 1 5 | 2 8 | 3 20 | 4 10 |
|-----|-----|------|------|

3. Визначити магнітну напругу U_m в амперах на ділянці магнітного кола, магнітний опір $R_{m2} = 10 \text{ 1/Гн}$, магнітний потік $\Phi = 0,8 \text{ Вб}$.

- | | | | |
|-----|-----|------|------|
| 1 5 | 2 8 | 3 20 | 4 10 |
|-----|-----|------|------|

4. Визначити магнітний опір R_m ділянки магнітного кола, якщо магнітний потік $\Phi = 0,8 \text{ Вб}$, а магнітна напруга $U_m = 80 \text{ А}$ в одиниця поділена на генрі.

- | | | | |
|-----|-----|------|------|
| 1 5 | 2 8 | 3 20 | 4 10 |
|-----|-----|------|------|

5. Визначити силу струму в амперах у котушці зі **100** витками, якщо магніторухійна сила котушки $F = 500 \text{ А}$.

1 5 2 2 3 20 4 10

6. Визначити кількість витків в котушці зі струмом $I = 5 \text{ А}$ і магніторушійною силою $F = 500 \text{ А}$.

1 2000 2 100 3 50 4 1500

7. Визначити магнітну проникність середовища магніто проводу в генрі поділених на метр, якщо напруженість магнітного поля в осерді складає 40 А/м . Магнітна індукція в осерді 2 Тл у Гн/м.

1 0,05 2 42 3 0,3 4 10

8. Чому дорівнює магніторушійна сила в амперах котушки з феромагнітним осердям в амперах, якщо котушка має 40 витків з електричним струмом 5 А .

1 45 2 200 3 100 4 500

9. Визначити магнітний потік у веберах в магнітопроводі з площею поперечного перерізу магнітопроводу $0,01 \text{ м}^2$ і магнітною індукцією в магнітопроводі 7 Тл у веберах.

1 5 2 0,07 3 155 4 0,6

Тестові завдання для самоаналізу до лабораторної роботи
«Дослідження індуктивної котушки з феромагнітним осердям»

1. Вкажіть математичне рівняння магнітного потоку через намагнічуючу силу і магнітний опір:

1 $\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{w \cdot I}{R_m}$

2 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

3 $\Phi = w \cdot i \cdot R_m$

4 $\Phi = \mu \cdot l \cdot S$

2. Як називається графічна залежність між напругою і силою струм?

- 1 вольт-амперною;
- 2 кулон-вольною
- 3 вебер-амперною
- 4 ампер-секундною

3. Як називається графічна залежність між магнітним потоком і силою струму?

- 1 вольт-амперною
- 2 кулон-вольною
- 3 вебер-амперною
- 4 ампер-секундною

5. Як називається графічна залежність між кількістю зарядів і напругою?

- 1 вольт-амперною
- 2 кулон-вольною
- 3 вебер-амперною
- 4 ампер-секундною

6. Математичний запис закону електромагнетизму для котушки зі сталлю в колі змінного струму:

1 $\psi = w\Phi = Li$

2 $\psi = \Phi_m \sin \omega t$

3 $\psi = w \cdot i \cdot R_M$

4 $\psi = \mu \cdot l \cdot S$

7. Вкажіть математичну залежність магнітного потоку від намагнічуючого струму, число витків і магнітний опір:

1 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

2 $\Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{w \cdot I}{R_M}$

3 $\Phi = w \cdot i \cdot R_M$

4 $\Phi = \mu \cdot l \cdot S$

8. Як розрахувати силу струму ідеальної котушки в комплексній формі.

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{jx};$$

$$\dot{I} = \frac{U}{L};$$

$$\dot{I} = \dot{U} \cdot jx;$$

$$\dot{I} = \frac{U}{R}.$$

14. Визначити магнітну індукцію в теслах в осерді котушки, якщо напруженість магнітного поля в робочій точці **400 А/м** і магнітна проникність матеріалу магнітопроводу дорівнює **0,01 Гн/м**.

1 4

2 0,6

3 500

4 60

15. Визначити магнітний потік у осерді котушки у веберах при магнітній індукції в магнітопроводі котушки **5 Тл** і перетині магнітопроводу дорівнює **0,08 м²**.

1 5,8

2 0,4

3 0,7

4 9

16. Вказати рівняння миттєвого значення намагнічуючого струму, якщо ідеальна котушка з феромагнітним осердям споживала діюче значення струму **2 А**, початкова фаза струму **30°**:

1 $i = 2,82 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ)$ А

2 $i = 1,82 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ)$ А

3 $i = 0,82 \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$ А

4 $i = 5 \cdot \sin(\omega t + 20^\circ)$ А

17 Чому дорівнює індуктивний опір ідеальної котушки з феромагнітним осердям в омах, якщо її підключили до джерела змінної синусоїдної напруги $u = 282 \sin(\omega t + 30^\circ)$ В, а котушка споживала діюче значення струму **2 А**.

1 100

2 5

3 150

4 19

18. Визначити індуктивність котушки у генрі, якщо індуктивний опір ідеальної котушки, підключеної до джерела змінної синусоїдної напруги дорівнює **31,4 Ом**. Кругова частота джерела **314 рад/с**.

1 0,05

2 0,1

3 0,08

4 0,5

25. Визначити активну потужність у ватах, що виділяється в осерді котушки з феромагнітним осердям, підключеної до джерела змінної синусоїдної напруги. Ватметр показав **1500 Вт**. Активна потужність, що виділяється в провідах даної котушки дорівнює **1200 Вт**.

1 400

2 100

3 25

4 300

Навчальне видання

Попова Ірина Олексіївна,
Курашкін Сергій Федорович,
Вовк Олександр Юрійович,
Попрядухін Вадим Сергійович

Теоретичні основи електротехніки, частина 3

Навчальний посібник

Підп. до друку
Формат 60x84¹/16.
Папір офсет. Друк офсет.
Ум.друк.арк. 15,88
Наклад прим.

Видавництво та друк: видавничо-поліграфічний центр «Люкс»